

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS

Sección de Químicas



TESIS DOCTORAL

**Nuevos parámetros para caracterizar los estados de
fragilidad del acero : memoria para optar al grado de
Doctor en Química Industrial**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR

Carlos Núñez Álvarez

Madrid, 2015

669.01
NUN

BIBLIOTECA UCM



5300125376

Universidad de Madrid
Facultad de Ciencias
Sección de Químicas

NUEVOS PARAMETROS PARA CARACTERIZAR
LOS ESTADOS DE FRAGILIDAD DEL ACERO

MEMORIA

para optar al grado de
Doctor en Química In -
dustrial, que presenta
Carlos Núñez Alvarez

Madrid 1969

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE - MADRID

Facultad de Ciencias Químicas

BIBLIOTECA

N.º Registro

14824

DEDICATORIA

A todo el estamento docente e investigador español que rige su vida por el calendario de su vocación y de su capacidad de trabajo y sacrificio.

I N D I C E

	<u>Pág.</u>
I).- INTRODUCCION	4
1.1.- El problema de la rotura frágil	4
1.2.- Fragilidad y rotura frágil	6
1.3.- Medida de la fragilidad	9
1.4.- Teoría de Griffith-Irwin: Tenacidad de rotura	11
1.5.- Procedimiento general para la esti- mación de G_c	15
1.6.- El ensayo de resiliencia	19
1.7.- Necesidad de técnicas más complejas: Péndulo Charpy instrumentado	23
1.8.- Evaluación de la tenacidad de rotura	25
1.9.- Cálculo de G_c a partir de ensayos dinámicos de flexión, con probetas entalladas	29
1.10.- Figuras	34
II).- TECNICA EXPERIMENTAL	37
2.1.- Método experimental	37
2.2.- Calibrado del péndulo	41
2.3.- Influencia de la tensión de alimenta- ción del puente	44
2.4.- Impulsos de señalización	47
2.5.- Identificación de las particularidades de la rama descendente de un pulso con el aspecto de su fractura	50
2.6.- Figuras	52
III).- FACTORES GEOMETRICOS	60
3.1.- Máxima flecha alcanzable	61
3.2.- Giro del vector de posición de la cuchilla del martillo	62
3.3.- Deslizamiento de la probeta sobre los apoyos	65
3.4.- Angulo de giro de la probeta	67
3.5.- Consideraciones macroscópicas sobre la propagación de la grieta en casos extremos idealizados	68
3.6.- Figuras	77
IV).- EXAMEN DINAMICO-ENERGETICO DEL ENSAYO CHARPY CONVENCIONAL: DEDUCCION DE RELACIONES ENTRE PARAMETROS DE CHOQUE	87
4.1.- Consideraciones dinámicas sobre el ensayo Charpy	87

	Pag.
4.2.- Energía cinética de una probeta rota . . .	94
4.3.- Relación entre las energías aplicadas y las energías Charpy absorbidas . . .	98
4.4.- Campo de valores del parámetro v_m : Parámetro utilizado en las experiencias de rotura	105
4.5.- Análisis y representación de la función $E_a = f(v_m)$	107
4.6.- Energía final en función de E_a y v_m . . .	112
4.7.- Relación de la energía aplicada a la absorbida	114
4.8.- La función $E_g = f(E_a, v_m)$, para un pendulo instrumentado: Intervención de φ y k	115
4.9.- Expresión teórica para la constante de calibrado	118
4.10.- Figuras	120
V).- CONFIRMACIONES EXPERIMENTALES DE LAS RELACIONES TEORICAS DEDUCIDAS	138
5.1.- Variación del cociente (ρ/A_t) con la energía aplicada	138
5.2.- Influencia de la carga aplicada sobre el área de los pulsos: Confirmación experimental	141
5.3.- Influencia de la carga aplicada sobre el tiempo de rotura, el límite elástico y la fuerza máxima en los pulsos	143
5.4.- Comprobación experimental de las funciones : $E_g = f(E_a, v_m)$; $E_f = f(E_a, v_m)$ y $E_g/E_a = g_f(E_a)$	145
5.5.- Figuras	150
VI).- ANALISIS DE LOS PULSOS	162
6.1.- Relaciones fuerza, tiempo y área bajo los pulsos	162
6.2.- Relaciones entre energías, velocidades y flechas: Comprobaciones experimentales del desdoblamiento de los pulsos	164
6.3.- Relaciones entre otras magnitudes y datos parciales	168
6.4.- Figuras	173
VII).- CALCULO DE LA ENERGIA REAL ABSORBIDA	179
7.1.- Revisión de los trabajos publicados.	179
7.2.- Corrección de B. Augland	180
7.3.- Corrección de pérdidas no detectables por los extensímetros	185
7.4.- Figuras	187

	Pág.
VIII).- ESTIMACION DE LA TENACIDAD DE ROTURA	188
8.1.- Posibilidad de medir la tena- cidad de rotura con un péndulo instrumentado:Tipos de fracturas	188
8.2.- Proporcionalidad directa entre la caída brusca de la carga y el porcentaje de fractura frágil	192
8.3.- Expresión de la fuerza en fun- ción de la longitud de grieta instantánea	194
8.4.- Expresión de la flecha en fun- ción de la longitud de la grieta instantánea	198
8.5.- Expresiones de la acomodación en función de la longitud de la grieta	201
8.6.- Expresiones para la tenacidad de rotura según el tipo de pulso	205
8.7.- Posibilidad de estimar la tenacidad de rotura a partir de registros fuerza-flecha.Primer caso: Pulsos del tipo A	208
8.8.- Segundo caso: Pulsos del tipo B.	213
8.9.- Tercer caso: Pulsos del tipo C	215
8.10.-Ecuación general para el cálculo de G_c	217
8.11.-Resumen y significado para las expresiones de G'_c	219
8.12.-Cálculo de la tenacidad de rotura a flexión en tres puntos	224
8.13.-Figuras.	226
IX).- DISCUSION	234
X).- CONCLUSIONES	253
XI).- APENDICE	
Aceros seleccionados y tratamientos térmicos	I
Resultados experimentales	III
Comparación de áreas parciales y totales co- rrespondientes a pulsos de probetas entalladas en "U" y en "V"	XII
Estimación del factor de concentración de tensión de una probeta Mesnager	XV
Tabla de valores experimentales de fuerzas medias , límites generales y fuerzas máxi- mas dinámicas	XVIII
Deducción de la expresión para el cálculo de la energía absorbida,dada por B.Augland	XX
Cálculo de la energía real.Deducción de M.Grumba	XXI
XII).- BIBLIOGRAFIA	XXIII

I.- INTRODUCCION

=====

1.1.- EL PROBLEMA DE LA ROTURA FRAGIL:

Desde el tratamiento de las placas de blindajes, con aceros cromo-níquel por el procedimiento Krupp, que presentaban el fenómeno de la rotura frágil, se han acumulado multitud de datos relativos a estudios realizados para explicar las causas que motivaron la rotura de grandes estructuras, puentes, buques, depósitos de almacenamiento de líquidos y de gases a presión, turbogeneradores, líneas de conducción de fluidos y recientemente depósitos de combustibles licuados con fines de propulsión - en cohetes, etc.

C.F. Tipper (1) ha clasificado un gran número de roturas frágiles y W.D. Biggs (2) ha presentado análisis estadísticos de las zonas más probables de rotura en cascos de buques. Se han estudiado y clasificado 2504 roturas frágiles en buques del tipo Liberty y 883 en buques-tanque, entre las que se cuentan las ampliamente difundidas de los buques S.S. Schoenectady, S.S. Ponagansett (3) y del World Concord, en 1943, 47 y 1954 respectivamente y grandes turbogeneradores como el de Ridgeland en Chicago (1954) de 165.000 Kw. Shank (1) describió 24 casos de roturas frágiles de tanques de almacenamiento de agua, aceites, combustibles y 4 casos en depósitos esféricos de presión. Han sido analizadas las causas de rotura del puente Hasselt (Bélgica) en 1938 así como otros 14 puentes construidos con aceros Bessemer. No menos sorprendentes resultan las roturas frágiles de "pipe-lines", dándose casos de roturas a gran velocidad que afectaron a longitudes de conducción del orden de un mi-

lómetro. Recientemente con el desarrollo de nuevos combustibles de propulsión para cohetes, con gases licuados o bien missiles de combustibles sólidos como los Polaris, que en definitiva son grandes depósitos a presión sometidos a fuertes aceleraciones se han presentado frecuentes roturas frágiles que han obligado a los más altos organismos a considerar con la máxima urgencia el problema de las roturas frágiles en las que ~~se~~ encuentran involucradas no sólo grandes pérdidas económicas sino la seguridad personal y que desgraciadamente ya han costado numerosas vidas humanas. El estudio de las roturas frágiles que se presentan en diversas situaciones y equipos no sólo de aleaciones base hierro, sino también de algunas aleaciones no-férreas y hasta no metales, condujo a la conclusión de que el problema de la rotura, se presenta con gran complejidad, con la complejidad que caracteriza a los sistemas sólidos, en los que se han de considerar, entre otras, numerosas variables con carácter direccional y para los cuales no existen modelos como los desarrollados para el "estado" de los gases y líquidos.

Las roturas se presentan en equipos inmóviles o en funcionamiento, ubicados en tierra firme, en el mar o en el espacio atmosférico y bajo todo tipo de cargas estáticas o dinámicas simples o complejas y a diversas temperaturas.

1.2.- FRAGILIDAD Y ROTURA FRÁGIL:

Para describir el tipo de rotura o el aspecto de la fractura de un material, se usan los términos frágil y dúctil, reservando el término fragilidad para expresar la susceptibilidad a la rotura frágil. Los primeros términos se usan en relación con el comportamiento macroscópico que exhibe el material antes de la rotura. Si la separación del material va precedida de gran deformación plástica se dice que el material es dúctil y frágil en caso contrario.

Ambos tipos de roturas presentan fracturas características. Las fracturas dúctiles suelen aparecer con dos aspectos generales; fibrosas o cortantes. Las fracturas fibrosas presentan una superficie rugosa y más o menos plana, que es normal a la tensión de tracción, mientras que las cortantes presentan un aspecto fino y sedoso y tienen lugar a 45° de la tensión de tracción, en planos de máxima cisión.

Las fracturas frágiles son de tipo descohesivo o transgranular e intergranulares. Las descohesivas tienen lugar por separación a lo largo de planos cristalográficos definidos presentando facetas brillantes, mientras que las intergranulares son roturas a través de los bordes de grano. Existen numerosos factores que afectan en mayor o menor grado a la fragilidad, tales como, velocidad de deformación, temperatura, sistema de tensiones operante, etc.

Considerando la velocidad de deformación, a medida que ésta es más grande, ocurre que va disminuyendo la deformación

plástica que tiene lugar antes de la rotura. Por ejemplo, el alargamiento disminuye con la velocidad de deformación, ésta en definitiva va asociada a una mayor severidad del sistema multiaxil de tensiones. Algunos materiales presentan un cambio en el modo de rotura (de dúctil a completamente frágil) debido a la aplicación de altas velocidades de carga tal es el caso de los metales y aleaciones de estructura cúbica centrada.

La influencia de la temperatura en la fragilidad está asociada a la influencia que tiene sobre la carga máxima y sobre el límite elástico. A medida que baja la temperatura, la carga de rotura aumenta más lentamente que el límite elástico con lo que las posibilidades de deformación plástica se van restringiendo. Se ha comprobado que existe una equivalencia en tre la influencia de la temperatura y de la velocidad de defor mación, según la cual el logaritmo de dicha velocidad es una función lineal de la inversa de la temperatura.

La influencia de la temperatura en el comportamiento de los aceros se pone de manifiesto por la brusca transición a que da lugar, cambiando el modo de rotura y la absorción de energía en un intervalo estrecho.

La presencia de una entalla o grieta en un material sometido a un esfuerzo hace que se alcance una tensión elevada en la zona de mínima sección, con las consiguientes contraccio nes perpendiculares a la dirección de dicha tensión. Por otra parte, esta región está ligada a zonas no entalladas en las que todavía no se ha rebasado el límite elástico por lo que sus de

formaciones (en el campo elástico) son muy pequeñas y controlan las deformaciones de la zona de tensión elevada, desarrollándose tensiones perpendiculares que se oponen a la contracción y dan lugar a un sistema triaxial de tensiones. Estos sistemas triaxiales tienden a producir una especie de cavitación en el seno de la masa metálica y en estas condiciones el material presenta una elevada tendencia a la rotura frágil, aunque bajo una tensión de tracción simple, en ausencia de entalla, el material presenta un comportamiento dúctil.

1.3.- MEDIDA DE LA FRAGILIDAD:

En principio se ha tratado de encontrar alguna relación entre conceptos y propiedades relacionadas con el comportamiento dúctil, para apreciar por su ausencia, el grado de fragilidad de un material. El alargamiento, la estricción y el área bajo la curva de tracción, pueden describir parcialmente el carácter frágil.

Para estimar la susceptibilidad a la rotura frágil se practican varios ensayos con probetas entalladas que constituyen procedimientos normalizados, como son los ensayos de resiliencia o choque, tipos Charpy, Izod, etc. Tales ensayos clasifican a los aceros según su fragilidad, si bien la cifra de resiliencia no tiene valor como dato de diseño, dado que las condiciones en que se obtiene (tales como velocidad de deformación, sistema de tensiones, factor tamaño, etc.) son distintas a las que se dan en el material cuando forma parte de un equipo en servicio.

La medida de la susceptibilidad a la rotura frágil de diversos materiales se aprecia fijando las condiciones de ensayo y la forma de la probeta. Las probetas que corresponden a los ensayos más frecuentes son las denominadas con entalla en "U" y en "V". La práctica del ensayo exige numerosas precauciones con objeto de conseguir la mejor reproductibilidad en los resultados. Por ejemplo, es importante mantener en el mecanizado las tolerancias exigidas, especialmente la forma de la entalla, la frecuente comprobación de la distancia entre apoyos

on el péndulo, la garantía de que el martillo gira en un plano y que su cuchilla incide sobre la probeta en el plano medio de la entalla y de los apoyos, etc.

El ensayo de resiliencia no sólo ofrece una pretendida energía absorbida, en un choque con deformación y rotura si no que suministra, mediante la determinación de la curva de transición una visión de la respuesta del material cuando baja la temperatura, permitiendo comparar de una manera cualitativa el grado de fragilidad que se introduce en un material mediante un tratamiento térmico o mediante un tratamiento mecánico en frío.

1.4.- TEORIA DE GRIFFTH-IRWIN: TENACIDAD DE ROTURA:

La resistencia técnica cohesiva como criterio útil presenta diversos inconvenientes. Por una parte está afectada por la temperatura, sistema de tensiones, factor tamaño, etc. En el supuesto de que se mantenga un riguroso control de estas variables queda un aspecto propio del material que tiene una gran influencia en la rotura. En un material existe una distribución de tamaños de grietas orientadas más o menos favorablemente, entonces ocurre que estas dispersiones son características inherentes a los materiales y conducen para un mismo material a toda una distribución de frecuencias para la resistencia cohesiva de rotura a la que se llega a través de un punto de vista estadístico.

Dadas las discrepancias observadas en las estimaciones de las tensiones críticas para producir la rotura, Griffith en 1920 (4) aportó la idea básica sobre el tratamiento adecuado para la comprensión del fenómeno de la rotura. La formulación matemática de su teoría está basada en consideraciones energéticas, sobre la resistencia del vidrio, en el que admite la existencia de microgrietas preexistentes que poseen asociada una energía superficial. Según esto la grieta mayor comenzaría su propagación, cuando la relajación de la energía de deformación acumulada en el material fuera superior a la energía superficial asociada al aumento de las nuevas superficies de fractura. La preparación de varillas de vidrio cada vez de diámetros menores (reduciendo así el máximo tamaño posible de las microgrietas preexistentes) condujo sucesivamente a tensiones críticas de ro

tura mayores que se aproximaban a los valores de la resistencia teórica del vidrio.

Este éxito de la aplicación de un balance energético al proceso de rotura, estaba sometido a ciertas restricciones que Sack (5) extendió a estados de tensión triaxiales, en los que la tensión principal mayor, sería la única que tendría influencia, siendo normal al plano de la grieta.

Esta teoría que partía, al admitir la existencia de microgrietas, de un punto de vista macroscópico, no tuvo éxito para explicar la rotura de los metales. Hollomon y Zener (5) comunicaron que no era necesaria la presencia de microgrietas en el material y que tales grietas se pueden nuclear en determinados componentes frágiles de la aleación e incluso por mecanismos que explica la teoría de las dislocaciones.

Irwin analiza la rotura, como fenómeno que se presenta en materiales comerciales y, prescindiendo de mecanismos refinados, adopta un punto de vista macroscópico y describe la rotura en función de velocidades, energías, etc., y conceptos mecánicos.

Griffith suponía que durante el avance del vértice de una grieta, tenía lugar una relajación de la energía elástica acumulada en el material la que se consumía en energía superficial de las nuevas superficies libres de rotura. Irwin generalizó la aplicabilidad de la teoría de Griffith, sustituyendo el concepto de energía superficial, por un término de trabajo de

flujo plástico irreversible W , (por unidad de superficie de grieta, dW/dA) en el vértice de la grieta y que se nutre a expensas de la energía elástica, E , acumulada en el material.

La cantidad de energía de deformación elástica, por unidad de área, (dE/dA), que se relaja en el proceso de rotura, hace posible la misma, a partir de la condición crítica de que $dE/dA \gg dW/dA$ que es la base de cualquier cálculo para estimar la seguridad de la ausencia de una rápida propagación.

En los análisis de la rotura, se admite que el área de la grieta es igual a un ancho constante por su profundidad, (a). Durante la propagación de la grieta, la energía de deformación elástica ($\frac{dE}{da}$), almacenada en el material disminuirá a una velocidad determinada. Entonces, se denomina, velocidad de relajación de la energía de deformación, (G), a la cantidad de energía elástica relajada por una probeta, que contiene una grieta, como consecuencia del aumento de longitud de la misma y por unidad de área de fractura, tal como es descrito por Irwin. Por otra parte, el trabajo plástico irreversible absorbido en la deformación localizada en el vértice de la grieta más la tensión superficial de descohesión por unidad de área de fractura creada constituye la denominada "tenacidad de rotura", (G_c), y la condición necesaria para que se produzca la rotura sería que $G \geq G_c$.

Griffith dió un criterio energético referido a una condición de inestabilidad, es decir, respecto al comienzo de propagación de la grieta, pero Irwin añadió que la energía re-

lajada era proporcional a la longitud de la grieta y una función de su velocidad, mientras que en la condición de inestabilidad esta velocidad es nula.

Mott realizó un análisis dimensional, que indica que la velocidad de la grieta tiende a un valor límite que es una fracción característica de la velocidad del sonido en el metal. Boyd (6) considera que (dE/da) y (dW/da) asciende y desciende rápidamente a valores estacionarios, a medida que se origina la grieta, crece en carácter estable y se hace inestable, propagándose rápidamente. Según esto una grieta que se propaga en un sólido frágil requiere poca energía para continuar su propagación, pero sería necesaria una energía mayor en el caso de una grieta estable cuando no se da la condición crítica de autopropagación.

1.5.- PROCEDIMIENTO GENERAL PARA LA ESTIMACION DE G_c .

Irwin y Kies han presentado un procedimiento completamente general para la determinación de G , que no está limitado al modo de rotura (tipo de tensión que actúa con la grieta) ni a una forma particular de probeta.

Irwin y Wells (7) consideran, en general, a una probeta como un medio que tiene una grieta de longitud (a) . Se presenta el diagrama carga-alargamiento para dos longitudes de grieta casi iguales (Fig. 1).

$$(a) \quad \text{y} \quad (a + da)$$

El área del triángulo comprendido entre (a) y $(a + da)$ representa el producto $(G.da)$. Designando por P , a la carga por unidad de espesor de probeta, definen la "acomodación" C según:

$$l = C P$$

siendo (l) el aumento de longitud de la probeta o alargamiento a carga P . Haciendo

$$C = \frac{l}{P}$$

resulta.

$$P = M.l$$

Donde M representa el cociente entre carga y alargamiento y

la acomodación según esto tiene el significado de la inversa de un módulo secante de una probeta que contiene una grieta de longitud (a) .

El valor de G vendría dado por

$$G = \frac{1}{2} P^2 \frac{d}{da} \left(\frac{1}{M} \right) \quad (1)$$

Lo que exige conocer los valores instantáneos de P , por lo tanto, el valor de esta carga, en el instante en que comienza la brusca propagación de la grieta.

Es necesario, además, efectuar medidas de $(C = 1/M)$ de las curvas carga-alargamiento correspondientes a una serie de profundidades de grieta conocidas; representado con los pares de valores $(\frac{1}{M}, a)$, una curva para las diferentes longitudes de grieta, que avanza desde el lado de la entalla a la cara opuesta.

Esta curva nos permite obtener otra, una vez que se miden las pendientes de la curva $(1/M, a)$, para una serie de valores de (a) . De esta manera se determina el valor de

$$\frac{d}{da} \left(\frac{1}{M} \right)$$

que, con la correspondiente carga P , nos permite estimar G_c en la expresión (1).

Irwin Kies y Smith (8) encontraron que en ensayos de flexión lenta, (carga en tres puntos), los valores de G_c determinados aumentaban con la disminución del espesor de la probeta, siendo ya sensible el aumento (aprox. un 10%), cuando el espesor de la probeta era de una pulgada, lo que aconseja para este procedimiento el prescindir de espesores de probeta inferiores.

Las experiencias de Winne y Wundt (9) comparan los valores de G_c obtenidos en diferentes ensayos de flexión de probetas de profundidad de entalla variable, con ensayos de roturas de discos a altas velocidades de giro, encontrando una concordancia aceptable para el valor de G_c estimado por diferentes métodos experimentales lo que constituye un apoyo firme a la hipótesis de que G_c es una propiedad inherente al material.

Brown y Srawley (10) presentaron un informe referente al diseño de probetas y métodos de ensayos para la medida de la resistencia a la extensión de grietas, bajo condiciones de deformación plana. En los procedimientos de ensayos presentados, es necesario conocer la cuantía de la carga en el instante en que comienza la autopropagación de la grieta. Si bien los tipos de probetas usados son variados en su geometría y la situación y orientación de la grieta generada en la probeta también, en todos los casos es imprescindible el uso de algún transductor instalado en la máquina de ensayo, ya bien sea induc-

tivo, piezo-eléctrico u óhmico (extensímetros eléctricos), siendo éste el más generalizado por su simplicidad y buena precisión y el empleado en este trabajo.

Por otra parte es necesario para la determinación de G_c no sólo conocer la tensión en el instante que comienza la autopropagación, sino también la longitud de la grieta en el instante en que se hace inestable. La medida de longitudes de grieta exige un equipo adicional y calibrados previos que permitan asociar a cada valor de la carga, la longitud de grieta correspondiente.

En (10) se describen dos técnicas, basadas en extensometría eléctrica y en la caída de tensión de un circuito (que consiste en el material de la propia probeta) cuya longitud aumenta al aumentar la longitud de la grieta por estar dispuesto de manera que la corriente ha de redearla.

Winne y Wundt (9) y Bueckner (11) han publicado expresiones para el cálculo de G_c , si es conocida la geometría de la entalla y la tensión en el instante de la autopropagación de la grieta dichas expresiones serán utilizadas como pieza de toque, para comparar los resultados obtenidos en este trabajo.

1.6.- EL ENSAYO DE RESILIENCIA:

Entre los diversos ensayos mecánicos conviene destacar un aspecto fundamental que los divide. Unos se emplean para efectuar medidas de propiedades, bien definidas, y características de un material; otros únicamente sirven para dar idea cualitativa y restringida del comportamiento del material, usándose solamente con fines comparativos. En este último grupo cae de lleno el ensayo de resiliencia, que se viene usando ampliamente para apreciar la susceptibilidad a la rotura frágil.

El ensayo de resiliencia lleva por lo tanto implícita la idea de analizar una propiedad que represente las cualidades de rotura de un material y para lo cual es preciso provocar tal rotura. Para provocarla y conseguir la mayor representatividad posible del ensayo, se ha de simular de alguna manera, las condiciones reales en las que tiene lugar la rotura y más exactamente la rotura frágil. Puesto que la fragilidad está afectada por numerosos factores se ha de hacer uso de ellos para conseguir tal simulación.

La práctica del ensayo se realiza así, con altas velocidades de aplicación de la carga y con una entalla normalizada que simula las posibles grietas o defectos concentradores de tensiones que se dan en muchos equipos, sometidos igualmente a cargas dinámicas. Es posible tener en cuenta la influen

cia de la temperatura, de un modo cualitativo, mediante la determinación de una curva de transición; pero dado que las velocidades de aplicación de la carga son del orden de las unidades, en m/seg, el efecto concentrador de tensiones es un caso particular, y no se tiene en cuenta el factor tamaño, las cifras de resiliencia medidas tienen un valor limitado. En el caso de materiales dúctiles el ensayo de resiliencia no aporta nada que no se pueda apreciar mediante correlaciones del área bajo la curva fuerza-alargamiento de un ensayo de tracción que corresponde aproximadamente a la energía absorbida en el choque (12). En un ensayo de tracción la probeta experimenta una gran deformación, mientras que en el ensayo de choque se favorecen los factores que determinan la rotura. En este sentido parece entonces más racional el empleo de probetas entalladas en "V", ya que su acuidad por ser superior a la de la entalla en "U", determina una mayor concentración de tensión. (Véase apéndice **XII**).

El valor del ensayo de resiliencia estriba en un hecho simple y en otro hecho que podemos considerar como un hecho casual a la luz del status actual de conocimientos.

El primero radica en que el ensayo de resiliencia sirve para rechazar una muestra representativa de una partida de material, cuando una vez ensayada, la cifra de resiliencia resulta extremadamente baja. Esto, por otra parte, no garantiza que los materiales aceptados por una resiliencia admisible, no vayan a romper con carácter frágil en un equipo en funcionamiento.

Una segunda cualidad estriba en que para valores muy bajos de resiliencia ésta guarda una relación más o menos lineal con la tenacidad de rotura, pero a medida que ésta es mayor, la resiliencia se separa más de ella por exceso, aún en el campo de valores que corresponden a materiales que pueden presentar roturas frágiles.

Cuando se introdujo el ensayo de choque, se estableció que la resiliencia se debía expresar en (kgm/cm^2). Tanto la tenacidad de rotura como la resiliencia sirven para caracterizar estados frágiles de un material y ambas se expresan en unidades de las mismas dimensiones, sin embargo, no pueden aceptarse como equivalentes, puesto que la tenacidad de rotura es una propiedad del material, mientras que el valor de la resiliencia depende del método de ensayo, del tipo de probeta ensayada, etc, por lo que no se la puede considerar como una propiedad atribuible al estado del material.

Resulta evidente que la introducción de una entalla tiene por objeto favorecer la rotura y desarrollar un sistema eficaz de tensiones. En un caso se estima que la entalla en "U" es la más adecuada, por producir mayor deformación antes de la rotura, en otro caso se prefiere la entalla en "V", considerando que puede representar de una manera más general a las condiciones reales. En ambos casos, la pretensión de simular con una geometría única y unas condiciones particulares, los numerosos defectos, dispersión de tamaños, orientación de microgrietas preexistentes y multitud de geometrías concen-

tradoras de tensiones y tipos de éstas, despreciando el factor tamaño, hacen de la cifra de resiliencia algo cuyo parecido con una propiedad es puramente casual, y cuyo valor, no es otro que el que pudiera tener otro procedimiento tan arbitrario como el que mide la cifra de resiliencia. Todas estas consideraciones se hacen al margen de errores propios del ensayo, que introduce pérdidas de energía, que no son absorbidas por la probeta.

Desgraciadamente la medida de G_c entraña dificultades experimentales y los valores obtenidos pecan de una dispersión excesiva, por tratarse de una propiedad bien definida. Por otra parte, el ensayo Charpy convencional ha alcanzado tal generalidad que por ahora no se ve un método aceptable y mucho menos tan simple y económico, con el que se pueda obtener información, sobre el comportamiento frágil, por lo que en tal caso quizás su abandono esté supeditado al éxito de la determinación de G_c , al menos con aproximación suficiente. En tal caso es interesante analizar las posibilidades que hay, de conseguir valores aceptables del parámetro de tenacidad de Charpy, G_c .

1.7.- NECESIDAD DE TECNICAS MAS COMPLEJAS; PENDULO CHARPY INSTRUMENTADO.

El concepto de energía superficial del Griffith, que es adecuado para sólidos muy frágiles (vidrios, productos cerámicos, plásticos, etc.) en los que rebasada la barrera elástica, cualquier comienzo de deformación plástica, por pequeña que sea, conduce a la rotura, pierde su validez al aplicarlo a materiales metálicos.

En éstos y aún en sus roturas frágiles, existen vestigios de deformación plástica apreciable, (Orowan). Hemos comentado como el concepto de tenacidad de rotura toma en consideración la energía de deformación, asociada a la creación de nuevas superficies de rotura, y que las determinaciones de G_c por procedimientos de ensayo diferentes, concuerdan bastante bien en el sentido de poder mantener la hipótesis de que G_c es una propiedad del estado en que se ensaya un material metálico determinado.

La estimación de G_c exige el conocimiento de pares de valores instantáneos, carga-longitud de la grieta, que solo son posibles mediante dos técnicas instrumentadas que recogen ~~dicha~~ información simultáneamente.

Nuestra atención se centra en que el primer paso es conveniente para la sustitución del ensayo Charpy convencional, en la instrumentación, y de entre ellas, los extensímetros

eléctricos conducen a una técnica instrumentada simple y de fácil manejo que es indispensable para el conocimiento de las cargas instantáneas que sufre la probeta, una vez que comienza la propagación de la grieta. La medida directa de longitudes instantáneas de grieta se suple, admitiendo que en probetas frágiles la velocidad de propagación de dicha grieta puede ser estimada de los propios pulsos carga-tiempo, que suministra tal péndulo instrumentado, cuando la parte del pulso correspondiente a la etapa de rotura presenta un aspecto de buena linealidad, o en caso de curvatura apreciable, mediante un tratamiento que considere linealidades parciales y tan pequeñas como sea necesario en tal análisis.

1.8.- EVALUACION DE LA TENACIDAD DE ROTURA:

Srawley y Brown (10) analizan las restricciones a que está sujeto el ensayo y las probetas Charpy, cuando se usan con el propósito de identificar la cifra de resiliencia con G_c .

Tales determinaciones, se observa, requieren las siguientes suposiciones.

- 1^a) Que la pérdida de energía del martillo puede ser considerada como la energía necesaria para la formación de las superficies de fractura, y por lo tanto no hay disipación en cualquier otra forma.
- 2^a) Que la resistencia a la extensión de la grieta es necesariamente constante durante la propagación de la grieta.
- 3^a) Que con las suposiciones precedentes, si la fractura es cuadrada se puede considerar que G_c es igual al cociente energía/sección de la probeta en la entalla.

En varios trabajos (12) se presentan correlaciones resiliencia- G_c , pero los autores inicialmente citados concluyen que aunque la última hipótesis se aproxima en el caso de fracturas planas, pierde toda validez cuando varía el modo de rotura y aconsejan que el ensayo Charpy no debe llevarse

más allá de una selección preliminar de materiales y por supuesto nunca emplear sus determinaciones para diseños, en los que se trate de evaluar dimensiones críticas de grietas.

Diversos autores (13,14) admiten la posibilidad de efectuar determinaciones de G_c , mediante un péndulo instrumentado, basadas en que esta técnica permite el conocimiento de la carga máxima cuando se da la condición de inestabilidad, a la que comienza la propagación de la grieta.

La expresión propuesta

$$G_c = \frac{\pi(1-\nu^2)c}{E} \sigma_{\max}^2$$

donde ν es el coeficiente de Poisson, E el módulo de Young y c la profundidad de la entalla, lleva implícita la condición de que el estado de tensión en el vértice de la grieta es un estado de deformación plano, lo cual únicamente podría admitirse en fracturas completamente planas, o en probetas de gran anchura.

La sustitución de σ_{\max} se hace en función del momento flector máximo nominal de una viga (próbeta).

$$\sigma_{\max} = \frac{M \cdot h}{2 \cdot I_z} ; I_z = \frac{b \cdot h^3}{12} ; \sigma_{\max} = \frac{6 M}{b h^2}$$

Donde, M = momento flector

I_z = momento de inercia

siendo (b) y (h) las dimensiones indicadas en la Fig. 2-a, b y c .

En la misma figura, se presentan las dimensiones de la probeta Charpy y las de una probeta de flexión lenta (c). En la primera hay que tener en cuenta que la presencia de la entalla produce una exaltación de tensión que es una función del radio de curvatura y profundidad de la misma así como del ángulo que forman los lados de la garganta de la entalla, (c , ρ y ω),

Tomando para el factor de concentración de tensión el valor

$$\alpha_k = 2,36$$

véase apéndice ~~XV-XVII~~ entonces;

$$\sigma_{\max} = \alpha_k \sigma_n$$

tomando

$$M = \frac{F_{\max} \cdot l}{4} \quad \text{en} \quad \sigma_n = \frac{6 M}{bd^2}$$

donde (l) es la distancia entre apoyos (40 mm) y F_{\max} se

lee en los impulsos oscilográficos de cada rotura y (d) la profundidad de la probeta.

Finalmente la expresión de rotura dinámica sería:

$$G_c = \frac{36 \alpha_k^2 (1-\nu^2) \pi \cdot c M^2}{b^2 d^4 E}$$

donde

$$M = \frac{pl}{4} \quad l = 4 \text{ cms} \quad M = P \text{ Kg.}$$

$$c = 0,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$E = 2 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$(1-\nu^2) = 0,9$$

resultando

$$G_c = 0,24 \left(\frac{P^2}{10^6} \right) \frac{\text{kgm}}{\text{cm}^2}$$

Esta expresión resulta apreciablemente alta, comparada con las expresiones deducidas de las ecuaciones propuestas por Winne y Wundt (9) y por Bueckner (10) cuyos coeficientes son 0,18 y 0,10, respectivamente, frente al valor de 0,24, que no toma en consideración el efecto relativo de la profundidad de la entalla, respecto al espesor de la probeta bajo la misma.

1.9.- CALCULO DE G_c A PARTIR DE ENSAYOS DINAMICOS DE FLEXION, CON PROBETAS ENTALLADAS.

Winne y Wundt, según la teoría de Griffith-Irwin, en virtud de la cual G_c es una propiedad del material y como tal determinable por diferentes tipos de ensayos, proponen para su determinación, mediante un ensayo de flexión lenta, por su sencillez y bajo coste, la evaluación de G_c mediante una expresión sencilla.

La probeta, en este caso, es una barra de sección cuadrada o rectangular, con una entalla lateral de gran acuidad, sometida a un momento flector, aplicando cargas en 3 puntos.

Para probetas con entalla Shallow, análoga a la entalla Mesnager, en la que la profundidad de entalla (c) es pequeña comparada con la profundidad de la probeta (d), el empleo de la ec. siguiente

$$G = \frac{(1-\nu^2)\pi\sigma^2 \cdot c}{E}$$

conduce a valores razonables, en condiciones de deformación plana, usando como valor del campo de tensión en el vértice de la grieta

$$\sigma = \frac{6M}{d^2}$$

correspondiente a la máxima tensión de la fibra externa de una viga.

Entonces, la expresión para G sería:

$$G = \frac{\pi(1-\nu^2)36 M^2 c}{Ed^4} \quad (2)$$

Puesto que la máxima tensión en el fondo de la entalla es

$$\sigma_n = \frac{6M}{h^2}$$

para un ancho de probeta unidad y profundidad (h) en el plano de la entalla, Fig. 3-a y b, la ec. (2) se puede escribir:

$$G = \frac{(1-\nu^2)\pi h^4 \sigma_n^2 c}{Ed^4}$$

6

$$G = \frac{(1-\nu^2)\sigma_n^2 h}{E} \quad f \left(\frac{c}{d} \right) \quad (3)$$

la $f(c/d)$ vale:

$$f\left(\frac{c}{d}\right) = \pi \frac{c}{d} \left(1 - \frac{c}{d}\right)^3 \quad (4)$$

En nuestro caso, admitida la validez de esta ecuación y según la Fig. 3, se aplica una expresión deducida de la ecuación de Irwin para el primer modo de rotura, en conjunción con las expresiones de Neuber para este tipo de entalla, que conducen a

$$G = 0,521 \frac{(1-\nu^2) \cdot \sigma_n^2 h}{E} \quad (5)$$

siendo

$$\sigma_n = \frac{6M}{h^2} \quad \text{y} \quad M = \frac{Pl}{4}$$

$$l = 4 \text{ cm} \quad \text{y} \quad \sigma_n = \frac{6P}{1 \cdot h^2}$$

quedando

$$G = 0,52 \frac{36 (1-\nu^2) P^2}{E h^3} \cdot 10^{-2}$$

que para

$$(1-\nu^2) = 0,9$$

$$h = 0,8 \text{ cm}$$

$$E = 2.10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$G = 0,18 \left(\frac{P^2}{10^6} \right) \frac{\text{kgm}}{\text{cm}^2} \quad (6)$$

Winne y Wundt advierten que esta expresión no es válida cuando la profundidad de la entalla es una fracción moderada de la profundidad de la probeta en el plano de la entalla, (h).

Para probetas con profundidades de entalla arbitrarias, Buecker propone la ec. (3) sustituyendo la (4) por la siguiente:

$$f = \left(\frac{c}{d} \right) = 0,0126 + 1,976 \left(\frac{c}{d} \right) - 2.171 \left(\frac{c}{d} \right)^2 \quad (7)$$

que para $c = 0,2 \text{ cm}$ y $d = 1 \text{ cm}$.

$$f \left(\frac{c}{d} \right) = 0,32$$

y siendo

$$\sigma_n = \frac{6P}{h^2}$$

queda

$$G = \frac{0,32.36(1-\nu^2)P.2 \cdot 10^{-2}}{E. h^3}$$

que para

$$(1-\nu^2) = 0,9$$

$$E = 2 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$h = 0,8 \text{ cm}$$

resulta finalmente

$$G = 0,10 \left(\frac{p^2}{10^6} \right) \frac{\text{kgm}}{\text{cm}^2} \quad (8)$$

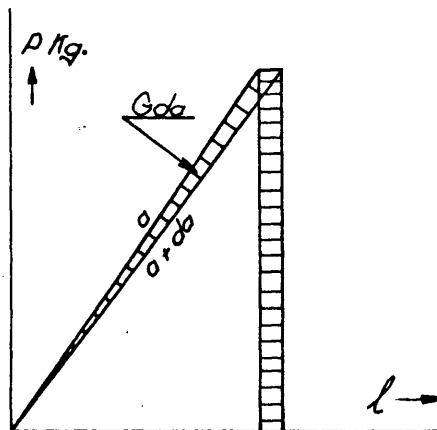


Fig 1. Diagrama esquemático carga-alargamiento, para una probeta que contiene una grieta de longitud (a) y $(a + da)$.

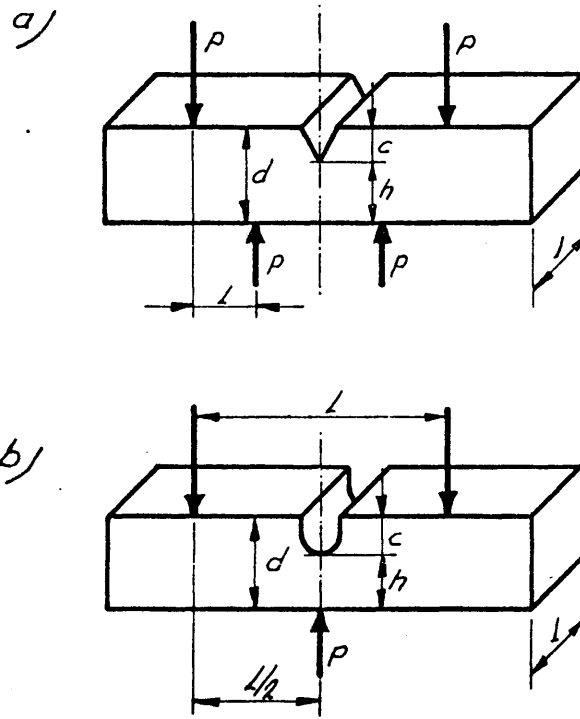


Fig.3 a), Dimensiones a considerar en probetas tipo Charpy en "V" y b), idem en probetas tipo Mesnager.

II.- TECNICA EXPERIMENTAL:

2.1.- METODO EXPERIMENTAL:

Para registrar la fuerza que ejerce la cuchilla del péndulo durante el choque, se cementaba dicha cuchilla dos extensímetros eléctricos, que siguen instantáneamente las deformaciones elásticas de la misma, produciéndose en ellas variaciones de resistencia que desequilibran un puente de Wheatstone, originando una señal eléctrica proporcional a la fuerza ejercida en cada instante por el martillo. Esta señal enviada al eje "Y" de un oscilógrafo conjuntamente con la base de tiempos del mismo, permite el registro fotográfico de pulsos constituidos por la variación temporal de la fuerza ejercida por el martillo en el periodo de choque.

En la Fig. 4, R_2 y R_4 son los extensímetros eléctricos (ramas activas del puente) siendo R_1 una resistencia del puente de valor aproximadamente igual al de R_3 y R_4 . R_3 es ligeramente menor y la resistencia variable (r) permite el ajuste del puente (con un instrumento de cero) antes de realizar cada experiencia.

Con las bandas óhmicas empleadas, de elevada resistencia, (600Ω , aprox.), no es necesaria una etapa intermedia de amplificación por lo que hemos prescindido de ella. Basta un oscilógrafo que permita trabajar en el campo de 1

a 5 mv/cm en el eje "Y", aprovechando la máxima sensibilidad límite tolerada por las bandas óhmicas.

Para la señal producida (ΔV) por el puente en función de la variación de resistencia en las bandas óhmicas se tiene

$$\Delta V = \frac{V_o}{2} \frac{\Delta R}{R}$$

Para las bandas comerciales usadas de $598 \pm 0,5 \Omega$, se da entre la variación de resistencia y la deformación, la relación

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \quad K = 1,98$$

tomando para $K = 2$,

$$\Delta V = V_o \frac{\Delta L}{L}$$

Siendo V_o , el voltaje de alimentación al puente, Entonces

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\sigma}{E} \quad \Delta V = \frac{V_o}{E} \sigma$$

Tomando $E = 2.10^4 \text{ kg/mm}^2$ y $V_o = 20$ voltios

Kg/cm^2	$\Delta L/L(\text{o/oo})$	$\Delta V(\text{mV})$
2000	1,0	20
1000	0,5	10
500	0,25	5
200	0,10	2

El registro fotográfico de un pulso exige disparar la base de tiempos un instante antes de que entre en contacto el martillo con la probeta. Se ha empleado en lugar de una célula fotoeléctrica una laminilla metálica elástica (bronce de berilio) (L), Fig. 5, formando un dispositivo electromecánico, mediante el cual esta laminilla entra en contacto con un pivote solidario al martillo, un centímetro antes de que el martillo y probeta entren en contacto. Al cerrarse este circuito una pila se encarga de excitar el disparo. Este sencillo dispositivo ha dado buenos resultados teniendo la precaución de mantener limpios los contactos.

En la (Fig. 4) aparece a la salida de la señal del puente un filtro que fue usado en las roturas previas, para eliminar elevadas frecuencias indeseables que se superponían al pulso, impidiendo apreciar sus detalles morfológicos. Posteriormente se vió que centrando bien el golpe, mediante una pieza con la que se comprueba que el choque se

produce en el plano de la pantalla, soltando el martillo lentamente mediante el cable de mando, para que su giro esté contenido en un plano, y comprobando que todos los circuitos estaban perfectamente apantallados, desaparecieron estas oscilaciones y otros parásitos, siendo innecesario el uso del filtro.

Aunque no se usó este filtro, se comprobó que respecto a las frecuencias de trabajo, no suponía pérdida de señal alguna dada la gran diferencia entre las oscilaciones parásitas y la de los pulsos.

La fuente de alimentación estaba formada por una batería que se suministraba de 24 a 27 voltios de corriente continua en montaje potenciométrico.

2.2.- CALIBRADO DEL PENDULO:

Para conocer la fuerza que ejerce el martillo sobre una probeta, cuando la señal se desvía un centímetro en el eje "Y" del oscilógrafo, es necesario efectuar un calibrado previo con el martillo en una prensa, análogamente a como se realiza un ensayo cuasiestático de compresión.

El martillo se sitúa en posición vertical de forma que su cuchilla está en contacto con la probeta en el plano medio de la distancia entre apoyos. Para reproducir la geometría de los apoyos, se construyó un útil, que es una fiel reproducción de los apoyos de la máquina Charpy. El conjunto se somete a compresiones crecientes, estabilizando la carga y haciendo lecturas de las desviaciones del haz luminoso y las correspondientes fuerzas aplicadas.

Los experimentos se efectuaron para varias tensiones de alimentación del puente, las que se mantenían constantes.

Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 6, en la que cada punto corresponde a un valor medio de 3 a 5 determinaciones.

Se efectuaron 81 medidas entre 500 y 3200 Kg. de fuerza, con un manómetro patrón de 0 a 100 atm. y 56 medidas de 125 a 1400 Kgr. con un manómetro Bourdon de 0,5% de error máximo.

Se encuentra que por encima de una fuerza de 500 Kg. la relación fuerza aplicada-desviación del haz es lineal, o sea, la desviación del haz en ordenadas en la pantalla del oscilógrafo es directamente proporcional a la fuerza que ejerce el martillo sobre la probeta en las condiciones geométricas del ensayo. La zona por debajo de 500 Kg. en la Fig. 6 no afecta a la interpretación de los oscilogramas por cuanto que las fuerzas mínimas a considerar son superiores a ésta.

Las rectas de calibrado R_1 y R'_1 , obtenidas con el manómetro de 0 a 100 atm., se ajustan a las siguientes ecuaciones experimentales

$$\begin{array}{ll} \text{Para : } V_0 = 22 \text{ voltios} & y_{22} = 553,0 (\Delta cm_1) + 370,7 \\ V_0 = 18 \text{ "} & y_{18} = 673,7 (\Delta cm_1) + 328,7 \end{array}$$

Como se ve en la figura, la extrapolación para buscar la ordenada en el origen conduce a dos valores diferentes lo que hace suponer una falta de reproducibilidad, que se atribuye a una falta de exactitud en las divisiones de comienzo de escala del manómetro de 0 a 100 atm.

De las determinaciones efectuadas con el manómetro 0 a 30 atm. se encuentra para R_2 y R'_2 , las siguientes

ecuaciones:

$$\text{Para } V_0 = 22 \text{ voltios} \quad y_{22} = 553,1(\Delta cm_i) + 212 \quad (9)$$

$$V_0 = 18 \quad " \quad y_{18} = 672,0(\Delta cm_i) + 212$$

En este caso la extrapolación conduce sensiblemente a la misma ordenada en el origen.

2.3.- INFLUENCIA DE LA TENSION DE ALIMENTACION DEL FUENTE.

Se procedió a continuación a efectuar una tercera serie de determinaciones, para las circunstancias más variadas de trabajo, y aplicando una carga de 803,8 kg, que para las condiciones de trabajo adoptadas de $V_0 = 14$ voltios, dan un valor de:

$$\varphi = 414 \frac{\text{kg}}{\text{cm}} \text{ de eje Y}$$

En lo sucesivo φ se denomina constante de calibrado.

Este valor de φ se refiere a un centímetro de eje "Y" (eje de fuerzas de los pulsos) en fotografías o dibujos con una ampliación lineal de $x = 2,5$, respecto al pulso registrado en la pantalla del oscilógrafo. La constante de calibrado toma entonces el valor de $\varphi' = 414 \cdot 2,5 = 1035 \text{ Kg/cm de eje "Y" en la pantalla del oscilógrafo.}$

Un factor que modifica el valor de φ ó φ' es la tensión de alimentación al puente de Wheatstone, dos de cuyas ramas las constituyen los extensímetros eléctricos conectados a la cuchilla del péndulo. A medida que se eleva dicha tensión se dispone de mayor señal a la entrada del oscilógrafo. Esta elevación con una previa selección del tipo de banda, permite señales que no necesitan ser amplificadas, pero la tensión sólo se puede subir hasta un límite fijado por la máxima intensidad de trabajo en

los extensímetros. Se efectuó una serie posterior de determinaciones cuyos resultados se presentan en la Fig. 7 que permite conocer mediante este calibrado el valor de la constante φ para cualquier tensión de trabajo.

La expresión analítica (10)

$$\varphi = 4000\left(\frac{1}{V_0}\right) + 127 \quad (10)$$

se adapta a la recta de la Fig. 7, según se ve en la tabla siguiente. (Es posible ajustar datos y comparar resultados de rotura obtenidos con diferentes tensiones de alimentación del puente).

Datos Experimentales		Valores calculados según (3)		error relativo según (3)
V	$\left(\frac{1}{V_0}\right)10^2$	φ	φ de (3)	$\epsilon(\%)$
23,5	4,25	298	297	-0,34
22	4,54	306	309	+0,98
20	5,00	327	327	0,00
18	5,55	354	349	-1,41
14	7,14	414	413	-0,24

Frecuentemente se plantea la conveniencia de modificar la tensión de alimentación del puente, para aumentar o reducir la altura de la señal. La elección de bandas de elevada resistencia óhmica, permite tensiones de alimentación más elevadas y entonces se puede prescindir de la etapa previa de amplificación, pasando directamente la señal del puente al oscilógrafo.

Cuando se realizan experimentos con diversos aceros y con unas condiciones constantes de trabajo, ocurre que se registran unas veces pulsos muy pequeños y otros muy grandes. Para evitar esto, basta modificar la tensión de alimentación subiéndola o bajándola, respectivamente. El valor de la constante de calibrado, φ , experimenta variaciones con las modificaciones de V_0 , pero basta un calibrado previo a dos tensiones de alimentación para obtener la recta de la Fig. 7, la que nos permite, según la tensión de alimentación elegida, leer la correspondiente constante de calibrado.

2.4.- IMPULSOS DE SEÑALIZACION:

El registro fotográfico de los pulsos permite el conocimiento de numerosos parámetros de un choque con deformación y rotura. Así como el comienzo del choque está claramente definido no ocurre lo mismo respecto al final del pulso y mucho menos respecto al instante en que se nuclea la grieta, aunque es generalmente admitido que tiene lugar poco antes de alcanzarse la carga máxima.

En la Fig. 8 se aprecia que el dispositivo de señalización indica bien que el punto O está en la vertical de la línea de trazos, es decir, detecta que el comienzo de la subida de la curva en el pulso corresponde al instante en que entra en contacto el martillo con la probeta y que por lo tanto se considera el instante cero de comienzo del choque.

La señalización se efectuó con hilo metálico finísimo cementado a la cara de la probeta donde golpea el martillo, o cementándolo en el fondo de la entalla. En la Fig. 9, se indica el circuito simple que produce los escalones de los instantes del choque que se desean señalar usando el segundo haz del oscilógrafo cuando dichos hilos se rompen, bien porque lo corta el martillo al entrar en contacto con la probeta o bien porque la grieta alcanza la superficie del fondo de la entalla.

De forma más o menos clara (según el tipo de acero) aparece en los pulsos una discontinuidad (E_d), Fig. 10, considerada como un límite elástico dinámico a flexión, superada la cual, suele aparecer otra discontinuidad más difícilmente reconocible, que mediante el circuito (S, C, G, E, G', T) se ha identificado como el instante en que la grieta alcanza la superficie del fondo de la entalla en (E). Fig. 9, admitiéndose que el estado de la grieta es el (M) y cuando se alcanza la carga máxima, $F_{A,B,C}$. Los puntos indicados por (g_1 , g_2 y g_3) en la Fig. 8 serían los correspondientes al estado de la grieta (E), grieta que es estable hasta que se alcanza la carga $F_{A,B,C}$ donde tiene lugar la rápida propagación.

Los pocillos (P, P') llenos de mercurio permiten al arrastre de los hilos (O, O, C') ó (O, G, E, G', C'), sin perjudicar al resto del equipo.

Para detectar el final del pulso se cementó un hilo en la arista de la probeta pero sin rebasar el borde de la cara (A).

No se pretende que tales señalizaciones tengan carácter rigurosamente cuantitativo, respecto a la medida de intervalos de tiempo, fuerzas, a las que tienen lugar las particularidades descritas, sino que se dan con valor aproximado y con buen carácter cualitativo.

Parece que si la grieta se nuclea por debajo de la superficie del fondo de la entalla, las intersecciones (g_1 , g_2 y g_3) no indican el instante de nucleación de la grieta, sino el instante en que una grieta estable alcanzó la superficie del fondo de la entalla.

2.5.- IDENTIFICACION DE LAS PARTICULARIDADES DE LA RAMA
DESCENDENTE DE UN IMPULSO CON EL ASPECTO DE SU FRAC-
TURA:

En (15) se comentó el aspecto de las fracturas frágiles y tenaces que se distinguían por su aspecto brillante con surcos radiales y surcos horizontales y aspecto mate, respectivamente.

Estos aspectos coinciden bien con la morfología de la rama descendente de los pulsos, Fig. 10.

En un trabajo reciente, M. Grumba, M. Prudhomme y G. Sanz presentan una buena confirmación experimental de que

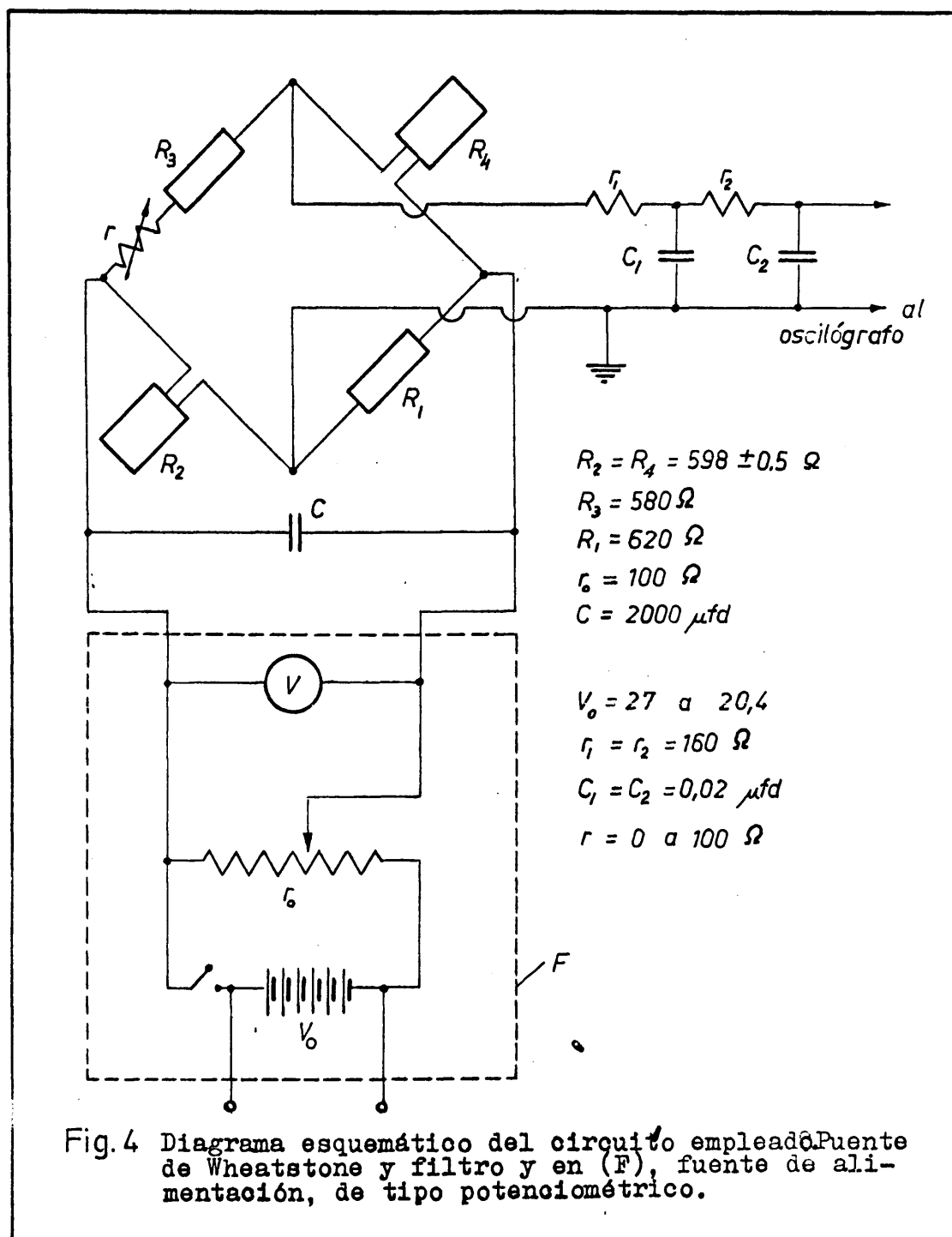
$$\frac{b.e.100}{h.e.} = \frac{\Delta F}{F_{\max}} 100 \qquad \frac{b}{h} 100 = \frac{\Delta F}{F_{\max}} 100$$

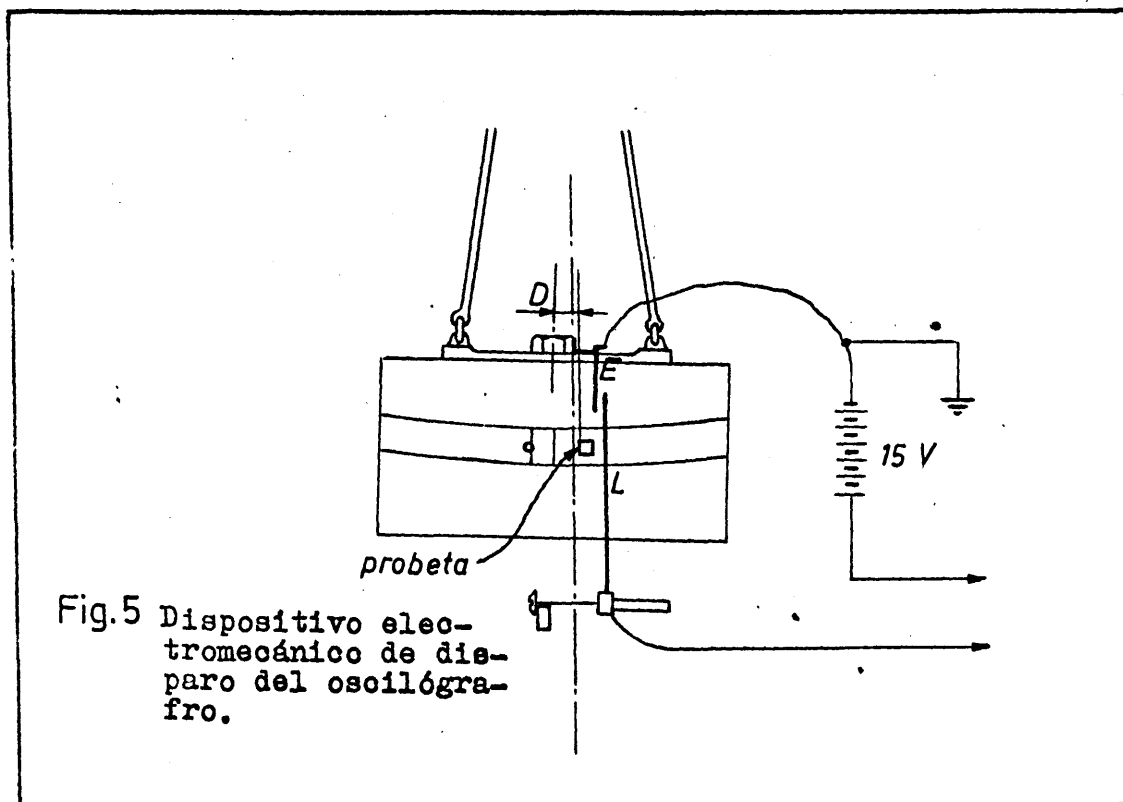
(véase Fig. 10). La caída de la carga respecto a la carga mínima es directamente proporcional al % de área de fractura frágil, planimetrada en una fotografía macrográfica.

La fractura frágil (b) tiene lugar a gran velocidad y se identifica con el tramo (b') del pulso, después de lo cual hay un tránsito en el aspecto de la fractura en la que coexisten zonas frágiles y tenaces entremezcladas

(c) y (c'), Fig. 10. En dicha zona tiene lugar una rápida disminución del avance de la grieta, dando lugar a fluctuaciones que suponen la absorción de energía de deformación hasta un pico máximo relativo de la fluctuación en el que se alcanza una acumulación de energía de deformación suficiente para provocar un pequeño avance de la grieta, por descargarse dicha energía, en el avance de la misma repitiéndose el proceso hasta que la resistencia a la propagación aumenta tanto, que es necesario un aporte continuo de energía del martillo, entonces la grieta avanza produciendo una fractura de surcos horizontales, a la que le corresponde la etapa (d') en el pulso.

Finalmente, en la Fig. 11, se han podido poner de manifiesto para un acero aleado, (F-123), las zonas de deslizamiento para choques ligeramente superiores al límite elástico dinámico y para un choque con rotura observándose que en probetas tenaces la grieta se propaga por la superficie lateral de la probeta en una de estas dos zonas de deslizamiento, en donde tiene lugar un aspecto de fractura cortante.





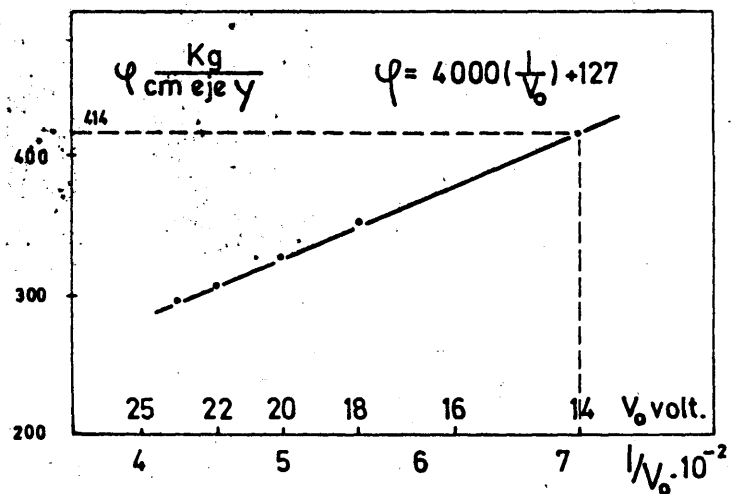


FIG.7 Influencia de la tensión de
 alimentación al puente (V_0),
 en la constante de calibrado.

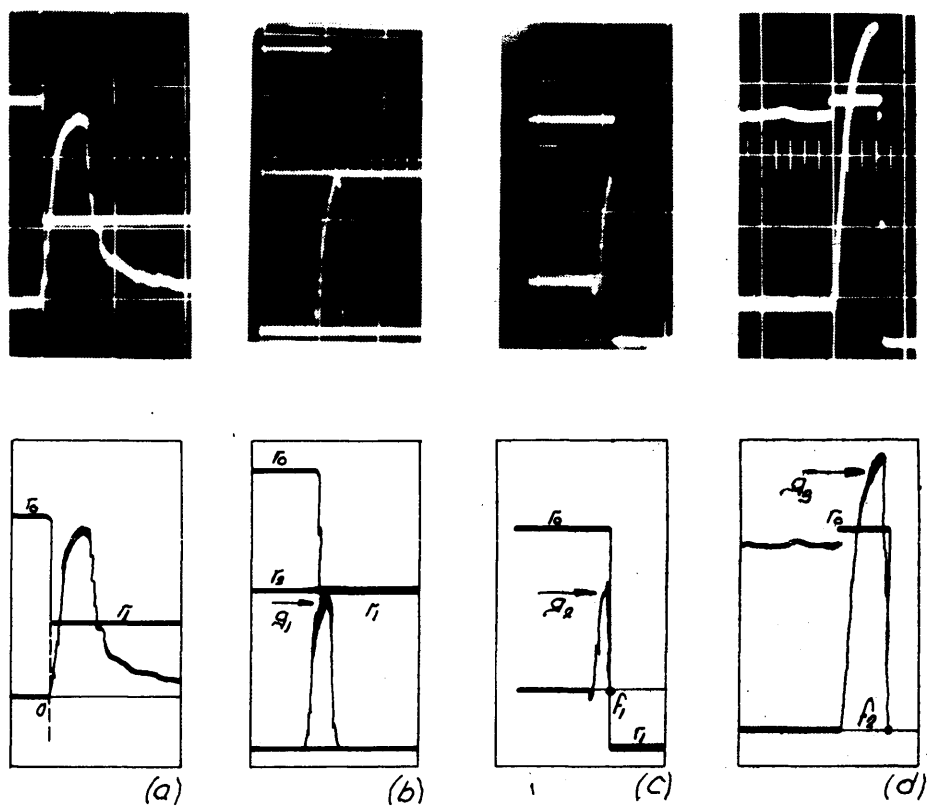


Fig. 8 Oscillogramas y sus dibujos esquemáticos obtenidos con un circuito adicional de señalización, que pone de manifiesto, el comienzo, aparición de la grieta y final del pulso.

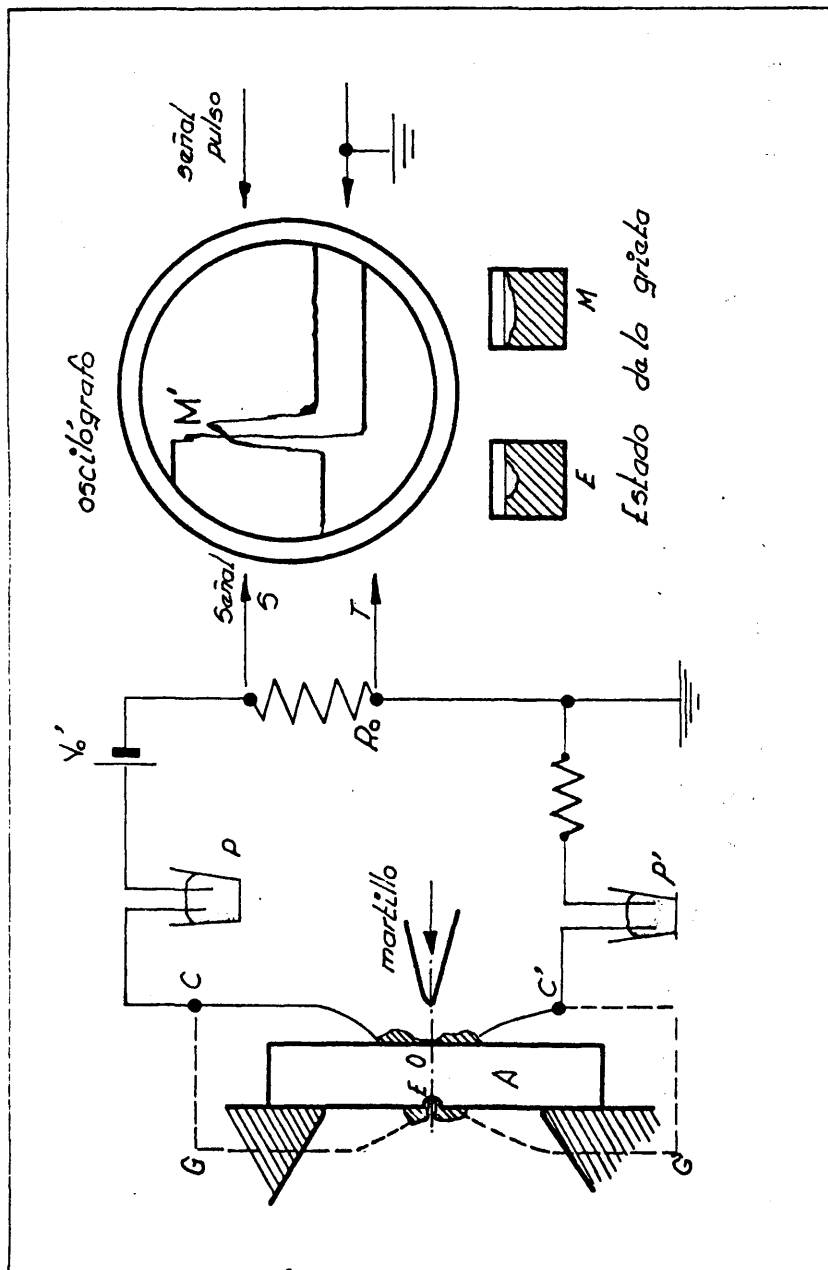


Fig.9 Circuito de señalización que opera con el segundo haz del oscilógrafo.

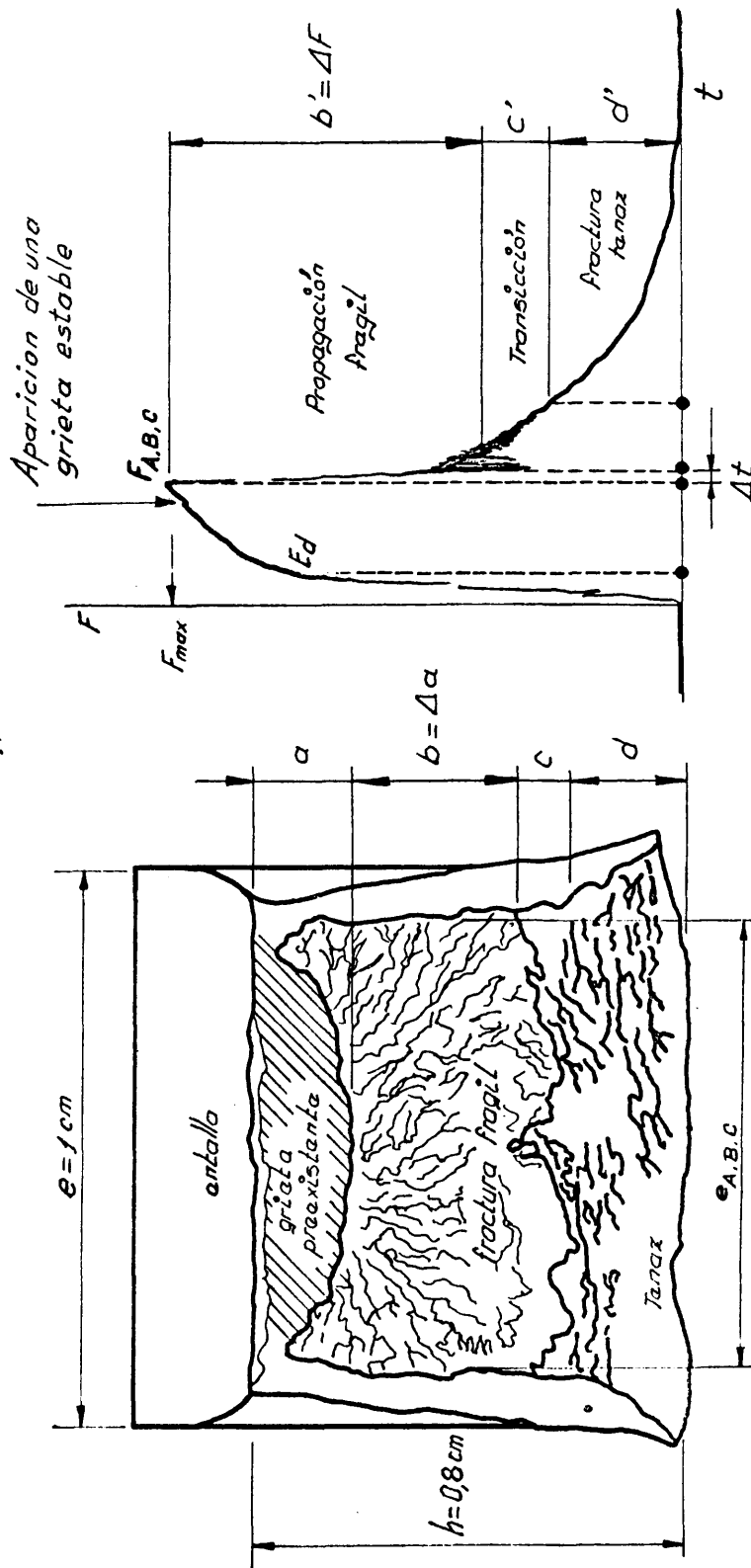


Fig.10 Identificación de las particularidades de un pulso, en su etapa de rotura, con el aspecto de la fractura correspondiente.



Fig. 11 a). Líneas de deslizamiento en una probeta de acero F-123, sometida a una fuerza superior a su límite general. b). Líneas de deslizamiento en una probeta rota del mismo acero.

III.- FACTORES GEOMETRICOS.

La apreciación de las cualidades de rotura que ofrece un material ha sido analizada desde un punto de vista microscópico. El fenómeno de la rotura de materiales metálicos ha sido analizado desde el punto de vista de los micromecanismos que tienen lugar a escala atómica, lo que proporciona una visión fundamental y básica para la comprensión de dicho fenómeno.

En cuanto a las cualidades de rotura que ofrece un material con fines de diseño, se adopta un punto de vista macroscópico, en el sentido de poder describir el fenómeno de la rotura, en función de variables y conceptos mecánicos sencillos.

La consideración de variables relacionadas con la geometría que impone el ensayo Charpy, no se ha revisado detenidamente. A continuación se trata de analizar determinadas limitaciones y las condiciones en que se practica el ensayo.

3.1.- MAXIMA FLECHA ALCANZABLE:

La máxima flecha que puede alcanzar una probeta en un choque con deformación y rotura o el recorrigido máximo durante el cual puede ejercer fuerza el martillo, se calcula suponiendo que la probeta no llega a romperse y cuela, empujada por el martillo, entre los apoyos, adoptando la posición indicada por OQ en la Fig. 12, en la que de los triángulos OPQ y OQO, se deduce que esta máxima flecha alcanzable PQ, es de

$$PQ = 31,4 \text{ mm}$$

3.2.- GIRO DEL VECTOR DE POSICION DE LA CUCHILLA DEL MARTILLO:

En la Fig. 12 se observa que el ángulo ω , que es el giro que experimenta cada mitad de probeta, es diferente al ángulo (α_v), de giro del vector de posición que desde (0) define la trayectoria de la punta de la cuchilla del martillo, que ejerce fuerza sobre la probeta, a lo largo de PQ.

Se tiene que:

$$\alpha_v = \beta + \gamma$$

$$\omega = 90 - \frac{\alpha}{2}$$

$$\alpha_v = 180 - \pi - \gamma - \frac{\alpha}{2} = 90 - \pi - \gamma$$

$$\omega = \gamma + \eta$$

$$\eta = 90 - \gamma - \frac{\alpha}{2}$$

$$t_g \eta = \frac{10}{27,5}$$

$$\eta = 0,349 \text{ rad.} = \underline{20^\circ}$$

$$t_g \beta = \frac{10}{20}$$

$$\beta = 0,463 \text{ rad.} = \underline{26^\circ 34'}$$

$$t_g \gamma = \frac{h}{20} = \frac{21,4}{20}$$

$$= 0,819 \text{ rad.} = \underline{46^\circ 56'}$$

$$\alpha_v = \beta + \gamma = 1,282 \text{ rad} = \underline{73^\circ 30'}$$

$$\omega = \gamma + \eta = 1,168 \text{ rad} = \underline{66^\circ 55'}$$

Esta diferencia se debe a que las mitades de la probeta giran respecto a PQ, a la vez que deslizan so

bre el punto O.

$$\pi = 90 - \beta$$

Para expresar, $\alpha_v = f(\pi, P_o, \delta)$; $P_o = 22,4 \text{ mm}$

$$\pi = 63^\circ 26'$$

Del teorema del seno y $(\eta + \frac{\alpha}{2}) = 180 - (63^\circ 26') - \alpha_v =$
 $= (\eta + \frac{\alpha}{2}) = 166^\circ 34' - \alpha_v$

$$\frac{\delta}{P_o} = \frac{\text{sen } \alpha_v}{\text{sen}(\eta + \frac{\alpha}{2})}$$

$$\frac{\delta}{22,4} = \frac{\text{sen } \alpha_v}{\text{sen}(116^\circ 34' - \alpha_v)}$$

$$\frac{\delta}{22,4} = \frac{\text{sen } \alpha_v}{\text{sen}(116^\circ 34') \cos \alpha_v \pm \cos(116^\circ 34') \text{sen } \alpha_v}$$

$$\delta = 22,4 \cdot \frac{\text{sen } \alpha_v}{0,894 \cos \alpha_v \pm 0,447 \text{sen } \alpha_v}$$

$$\delta = \frac{22,4}{0,447} \left(\frac{\text{sen } \alpha_v}{2 \cos \alpha_v \pm \text{sen } \alpha_v} \right)$$

$$\delta = \frac{22,4}{0,447} \left(\frac{\text{sen}}{2 \cos \pm \text{sen}} \right)$$

$$(\text{mm}) \quad \delta = 50 \frac{\text{tg } \alpha_v}{2 + \text{tg } \alpha_v}; \quad \alpha_v = \text{arctg} \left(\frac{2\delta}{50 - \delta} \right) \quad (11)$$

La función (11) se representa en la Fig. 13, existiendo un punto de inflexión para

$$\frac{d\alpha_v}{d\delta} = \frac{d(\arctg \mu)}{d\mu} \cdot \frac{d\mu}{d\delta} = \frac{20}{(\delta-10)^2 + 20^2}$$

$$\frac{d^2\alpha_v}{d\delta^2} = \frac{-20(2\delta-20)}{(500-20\delta+\delta^2)} \neq 0 \quad \delta = 10$$

$$\alpha = 0,463 \text{ rad}$$

$$\alpha = 26^\circ 34'$$

$$\alpha_v - \alpha_{v_0} = \left(\frac{d\alpha_v}{d\delta} \right)_{\delta=10} (\delta-10)$$

$$\alpha \text{ (rad)} = \frac{1}{20} - 0,037$$

$$(\delta = 0 ; \alpha_0 = -0,037.)$$

α_v varía de 0 a 1,282 rad = 73° 30', es decir, desde una flecha cero a la flecha máxima de 31,4 mm.

3.3.- DESLIZAMIENTO DE LA PROBETA SOBRE LOS APOYOS:

En la Fig. 14, se observa que en el avance del martillo de la posición P a la máxima Q, hasta la que teóricamente puede ejercer fuerza; la cara b de la probeta, inicialmente en reposo, con una distancia (CG = 20 mm), primero desliza sobre el apoyo (f) en el sentido (C₁f) a la vez que gira un ángulo ω_1 .

La variación de (b) (inicialmente b₀ = CG) con el avance (δ) del martillo en la dirección PQ se deduce de

$$\overline{CP}^2 = (\delta - 10)^2 = \overline{GP_1}^2 - \overline{GC}^2 = \overline{GP_1}^2 - 20^2$$

$$\overline{GP_1}^2 = b_2^2 + 10^2 ; (\delta - 10)^2 = b_2^2 - 300$$

y

$$b = \sqrt{(\delta - 10)^2 + 300}$$

$$\delta = 10 + \sqrt{b^2 - 300} \quad (12)$$

$$b = \sqrt{\delta^2 - 20\delta + 400} \quad (13)$$

En la expresión (13) se consideró que la probeta se dobla por sus dos lados, apoyada en el filo de cuchilla del péndulo.

En (16), se usó la expresión aproximada

$$b = \sqrt{\delta^2 - 10\delta + 400} \quad (14)$$

basada en la consideración de que durante la deformación plástica de la probeta, ésta lo hace a través de una zona central abarcada por los campos de líneas de deslizamiento, Fig. 15, pero cuando aparece la grieta y atraviesa esta zona, el citado punto de giro se va desplazando hacia el contacto, probeta-filo cubhillo del martillo terminando así la rotura. De ambas funciones, la (13) y (14), ésta parece la más útil para representar el valor de b , hasta que se origina la grieta y estando el valor de b comprendido entre ambas funciones hasta que coincide con el valor dado por la (13) en las proximidades y final de la rotura.

Según las medidas experimentales en probetas casi rotas, pero unidas por una minúscula sección, y que habían pasado por los apoyos, se midieron flechas máximas de unos 27,8 mm \simeq 28 mm. por lo que parece que la curva que más se adaptaría para describir el deslizamiento dado por b - sería la curva de trazos intermedia, Fig. 15.

3.4.- ANGULO DE GIRO DE LA PROBETA:

El ángulo de giro, ω , que experimentan ambas partes de la probeta, respecto al plano de la entalla en el que actúa el martillo, se deduce teniendo en cuenta, en la Fig. 16, que en ella

$$om = 20 - am \quad am = \frac{an}{\sin \omega} = \frac{10}{\sin \omega}$$

$$om = \frac{20 \sin \omega - 10}{\sin \omega}$$

$$t_g \omega = \frac{\delta - 10}{om} \quad \frac{\sin \omega}{\cos \omega} = \frac{(\delta - 10) \sin \omega}{20 \sin \omega - 10}$$

$$\delta = \frac{20 \sin \omega - 10}{\cos \omega} + 10 \quad (15)$$

Hemos visto que el valor máximo alcanzable de ω era de 1,168 radianes. En este intervalo se producirán todas las roturas.

$$0 \leq \omega \leq 1,168 \text{ rad.}$$

La Fig. 17 representa a la función (15), para el campo de valores de todas las roturas posibles.

Análogamente la curva $\omega = f(\delta)$ presenta un punto de inflexión sobre $\delta = 5 \text{ mm.}$

3.5.- CONSIDERACIONES MACROSCOPICAS SOBRE LA PROPAGACION DE LA GRIETA EN CASOS EXTREMOS IDEALIZADOS:

La energía que una probeta absorbe en el transcurso de su rotura (16), se desdobló conceptualmente y según los modos de absorción de energía que puede presentar el acero, en energías: elástica, plástica y de rotura o de creación de las nuevas superficies de fractura.

Estos tres modos de absorción de energía se presentan hibridados en un choque con deformación y rotura, según la zona de material que se considere, si bien en una misma zona puntual, la absorción de energía sigue esta secuencia de modos, es decir, considerando una zona fija en la probeta, tal como la que da luego origen a la aparición de la grieta; en ella el acero comienza por absorber energía elástica que puede almacenar la probeta o la zona que la absorbe según este modo es pequeña, la fuerza se eleva rápidamente y se rebasa el límite elástico dinámico en aquella zona, aunque en otras adyacentes y debido al estado de tensión no se haya alcanzado todavía el límite dinámico puntual.

La parte de los pulsos registrada que corresponde a esta etapa inicial, presenta una brusca subida hasta una discontinuidad apreciable interpretada como el límite elástico dinámico general. Si una probeta se somete a

golpes con inferior energía a la de su deformación permanente, se ve que no se alcanza esta fuerza y que las probetas recuperan su forma. Una vez rebasado este límite elástico dinámico, comienza en esta zona de la probeta la absorción de energía con deformación plástica, produciéndose zonas de deslizamiento visibles mediante el reactivo de Fry. En las Figs. 11 y 18 C, se presenta el aspecto del ataque de Fry, en una probeta tenaz. Existe un deslizamiento (L) en la parte exterior de la zona sombreada y un núcleo prismático de sección transversal aproximadamente elíptica, que constituye una zona rígida (i) respecto a la que comienza el giro de los lados de la probeta, ocasionando, debido al estado de tensiones, una acumulación de material en la zona (KK') (zona de compresión) y un defecto de material (zona de cavitación) en (o) que es la consecuencia del estado de tensiones creado por la entalla. El registro oscilográfico de la fuerza ejercida por el martillo presenta una rama ascendente cuya pendiente va disminuyendo, y que se corresponde con esta etapa de deformación permanente de la probeta. Análogamente una fuerza de esta cuantía es capaz de provocar una deformación, aunque no se produzca la rotura.

La consecuencia de un elevado estado triaxial de tensiones, ocasionado por la entalla, provoca la aparición de una cavidad o grieta en una zona o punto como el (O), Fig. 18 c. Cuando esta grieta avanza, Fig. 18 d, (zona sombreada) según el frente indicado por las flechas, la grieta

penetra en el prisma elíptico (00') central (líneas de trazos) y la fuerza que ejerce el martillo desciende paulatitinamente hasta cero, instante en que se ha consumado la rotura y separación de la probeta. La grieta se extiende primero desde el centro hasta las caras A y entonces todavía la fuerza aumenta ligeramente hasta un máximo que corresponde al momento en el que la grieta alcanza estas caras. Entonces los lados A y B de la probeta dejan de girar por deslizamiento (L) y lo hacen a expensas del progreso de la grieta en profundidad en el plano de la entalla. Cuando la grieta se extiende a las caras (A), se alcanza la condición de inestabilidad y al progresar la grieta la fuerza que ejerce el martillo (registrada oscilográficamente) cae simultáneamente con la disminución de la sección de la probeta.

Aunque la entalla desarrolla un estado triaxil de tensiones y dadas las condiciones del ensayo (tensiones variables), el aspecto superior de una probeta rota, Fig. 13 b, indica claramente, por su analogía con una rotura de copa y cono (a), que la rotura de la probeta en la aparición de la grieta, juega el papel principal una tensión de tracción, superior a las otras dos tensiones del sistema triaxil de tensiones, aunque no se pueda descartar la importancia de las otras dos. En (e) se presenta un hecho común a muchas roturas y es que la grieta en (p) presenta una inclinación próxima a 45° . Parece pues que una grieta en (o)

es debida a una preponderante tensión de tracción y se propaga primero según un plano de máxima cisión hasta la entalla y luego por ella hasta las caras A, B.

Una vez que se origina la grieta su velocidad de propagación depende de la resistencia que ofrezca el material. Si su tenacidad es baja, la grieta se extiende rápidamente, su vértice es muy agudo y una tensión normal a la fractura la alimenta hasta la rotura total. Tal es el caso de un comportamiento frágil. Cuando el material es tenaz, el vértice de la grieta es romo y absorbe gran energía en su propagación. En (15) se distinguió en el aspecto de las fracturas de dos casos extremos, frágil y tenaz, en el sentido de que las fracturas frágiles presentaban unas ramificaciones radiales (r), mientras que las probetas tenaces las presentaban según se ve en (h).

Estas observaciones sugirieron la consideración de frentes de propagación circulares o rectos. En estos dos casos extremos idealizados se pueden expresar las variaciones de área rota, a medida que avanza el frente de grieta por ecuaciones que representan la idealización de ambos casos. Para la Fig. 18 g, probetas frágiles, el área de fractura plana se extendería según:

$$A_1 = \frac{\pi h_1^2}{2} \quad (0 \leq h_1 \leq 5 \text{ mm}) \quad (16-1)$$

$$A_2 = \frac{h_2^2}{2} \left(\pi - 2 \arccos \frac{5}{h} \right) + 5 \sqrt{h^2 - 25} \quad (5 \leq h \leq 8) \quad (16-2)$$

$$A_3 = \frac{h^2}{2} \left(\pi - 2 \arccos \frac{5}{h} - 2 \arccos \frac{8}{h} \right) + 5 \sqrt{h^2 - 25} + 8 \sqrt{h^2 - 64} \quad (16-3)$$

$$(8 \leq h \leq 9,4 = \sqrt{8^2 + 5^2})$$

y para probetas tenaces:

$$A = ah + \frac{b-a}{2c} h^2 \quad (0 \leq h \leq c) \quad (17)$$

donde a y b son medidas experimentales en trozos de probetas tenaces deformadas y rotas. La sec. (16) se aproxima mucho más a la realidad que la ec. (17), dado que en probetas tenaces, aunque el frente avanza aproximadamente recto, la falta de planitud de la fractura (labios cortantes) hace que la ec. (17), pierda todo sentido ya que la zona plana presenta, debido a los labios, una curvatura con la convexidad hacia el centro de la probeta, y el aumento de esta área daría lugar a una función con la concavidad hacia abajo, un punto de inflexión y concavidad hacia arriba, mientras que en la Fig. 19, se presenta la variación del área con el avance de la profundidad de la grieta (h), para las funciones (16).

La curva de trazos (A_o) indicaría la sección A_{o1} , rota, a medida que aumenta la profundidad de la grieta, con salvedad del periodo inicial de crecimiento estable de la zona. Entonces parece que la disminución de la sección no rota en la probeta, con v_h , (siendo v_h la velocidad a la que se propaga la grieta) o sea, la disminución del área no rota con

el tiempo, da una curva que tiene la forma de la que presentan los pulsos, rebasada la carga máxima (condición de inestabilidad) o sea, en la parte que corresponde a la propagación de la grieta dependiendo el mayor o menor intervalo de abscisa de la etapa de rotura del pulso, de la velocidad de propagación de la grieta.

Hasta ahora no ha sido posible correlacionar bien todas las variables geométricas macroscópicas con parámetros de choque. Por ejemplo, en la Fig. 20, el martillo alcanza a la probeta en (aa'), según la recta r_1 , pero esta recta que está inclinada unos 17° de la vertical, a medida que avanza el martillo, Fig. 20, pasa a la posición de la recta r_2 , y ahora forma un ángulo menor; entonces el martillo recorre (δ) y la probeta sufre un giro (M), cuyo efecto le imprime el martillo en el plano de la entalla. Este giro se puede evidenciar por las huellas (h), que dejan los apoyos y el martillo sobre las probetas, así como en (e), se observa el perfil de la huella debido a la separación y acortamiento de la distancia b .

La geometría del ensayo influye también en el estado de tensiones, que principalmente se crea con la entalla, y todo contribuye a una gran complejidad en el estado de tensión y deformación de tal manera que convierte el ensayo en un caso particular, en lo que se refiere a estados de tensión y deformación que desembocan en la nucleación y propagación de una grieta con rotura. Consecuencia de esta particularidad, geométrica, de tensiones, etc, surge la imposibilidad de usar la cifra de resiliencia

cia de una manera directa, si bien el ensayo ha de conservar alguna cualidad en lo que se refiere a semejanza de estados triaxiales, etc., que le hacen útil en sentido comparativo o como ensayo que excluye la aceptación de un material.

Entonces si se pretende buscar una explicación a esta innegable cualidad del ensayo Charpy, es necesario reconsiderando todo el proceso de rotura que como tal ensayo, los sistemas triaxiales de tensiones producidos por entallas y las deformaciones que tienen lugar parecen encaminadas únicamente a la finalidad de conseguir la nucleación de una grieta, que se auto-propaga luego, o no; pero en todo caso, plantea la necesidad de originar una grieta y de considerar su propagación.

Parece también, que en este sentido es más lógica la práctica del ensayo con probetas entalladas en "V", que en "U". En la Fig. 21, se ve que los valores de la resiliencia en "V", son más bajos que los de probetas entalladas en "U", y por lo tanto más próximos a G_0 .

Entonces un ensayo que mide absorciones de energía en el choque con rotura y en el que, de estos datos, se desprende la utilidad del ensayo, convendrá examinar:

- a) Energías para producir grietas.
- b) Energías para propagar grietas.

En ambos casos, la comparación de una de estas energías parciales con el comportamiento del acero formando par-

te de equipos en servicio que han roto, pueden dar una mejor correlación o pueden dar una energía parcial que sea más representativa de la tenacidad de rotura, que la que en conjunto da la energía total.

La energía elástica se considera como una barrera de energía característica de cada metal o aleación que ha de superarse para alcanzar el campo plástico y el proceso de nucleación de la grieta y que en cualquier caso supone una parte menor de energía en probetas tenaces, o al menos en las de tenacidad aceptada por el ensayo para trabajo a temperaturas ambiente o próximas a ella.

La medida de energías para producir grietas ha de ser mayor con probetas entallas en "U" que en "V", mientras que una vez que se propaga la grieta, la resistencia a la propagación nada ya tiene que ver con la forma de la entalla. Sin embargo, los resultados Charpy de probetas en "U" no parecen despojados de la cualidad de exclusión de un material por la cifra de resiliencia, con lo que la admisión de este hecho resta importancia a la consideración de la energía absorbida para crear una grieta y centra a la energía necesaria para su propagación como más importante y en la que parece residir el valor del ensayo. Ultimamente se ha comprobado que el ensayo Charpy no es el idóneo para la apreciación de la tenacidad de rotura; pero ahora será difícil su sustitución por otro equipo, de forma que por su sencillez alcance la difusión y generalidad que alcanzó la máquina Charpy. A pesar de esto, lo que sí puede alcanzar una más fácil generalidad, es la instrumentación de los péndulos

existentes y la modificación del tamaño de la probeta, así como de la forma de entalla. Mediante la instrumentación, un péndulo puede suministrar gran información sobre la rotura, respecto a propósitos de diseño, y actualmente es una técnica indispensable en la apreciación de fuerzas instantáneas, en la etapa de rotura, para el cálculo de G_0 .

Para la apreciación de las energías hasta la creación de una grieta y para su propagación, se admite que tales energías se corresponden a las que se pueden deducir en los pulsos oscilográficos desde fuerza cero hasta la máxima fuerza alcanzada en el choque y donde ésta hasta el final de la rotura, respectivamente.

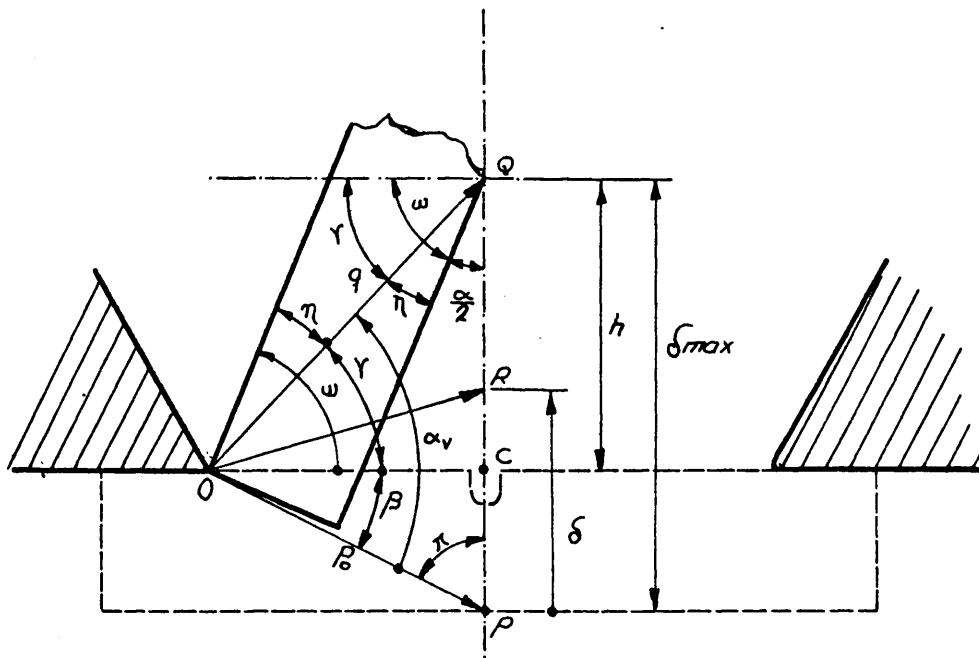


Fig.12 Giro que experimenta cada mitad de probeta. Vector de posición de la cuchilla del martillo y máximo recorrido (PQ) a través del cual puede ejercer fuerza sobre la probeta.

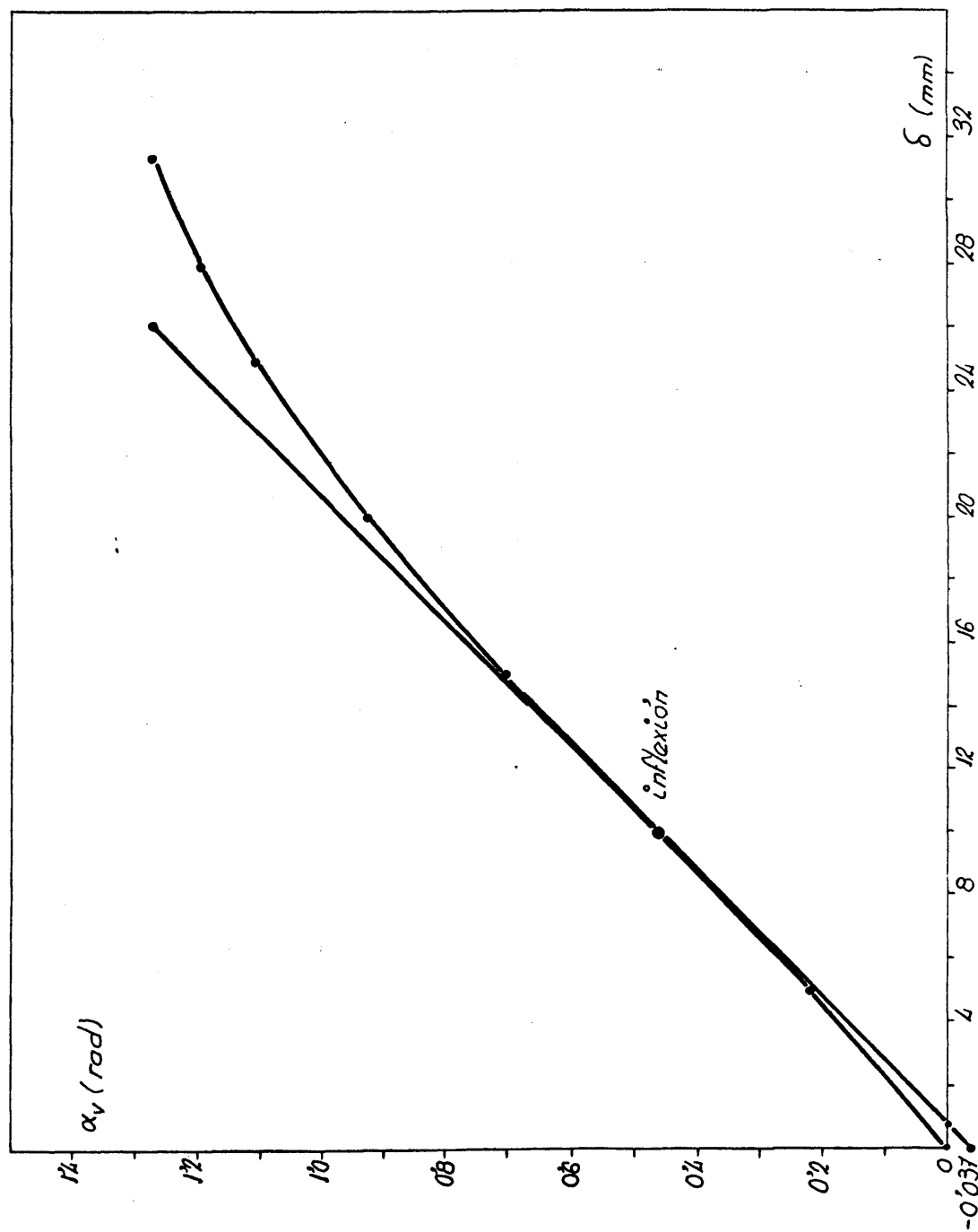


Fig.13 Giro del vector de posición en función del recorrido del martillo, para un choque de recorrido máximo.

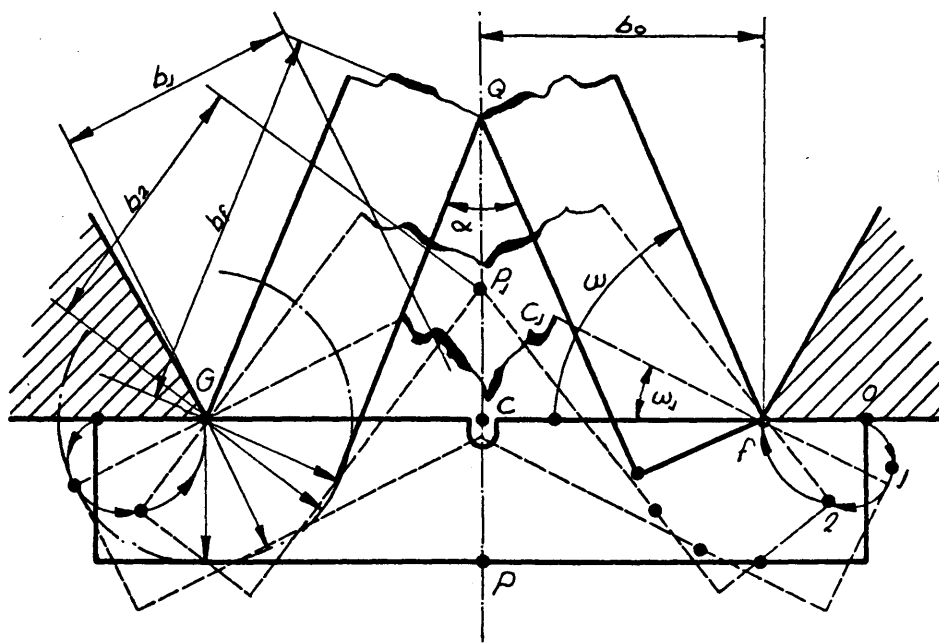


Fig.14 Deslizamiento de la cara (CO) de la probeta sobre los apoyos, para una rotura de recorrido máximo.

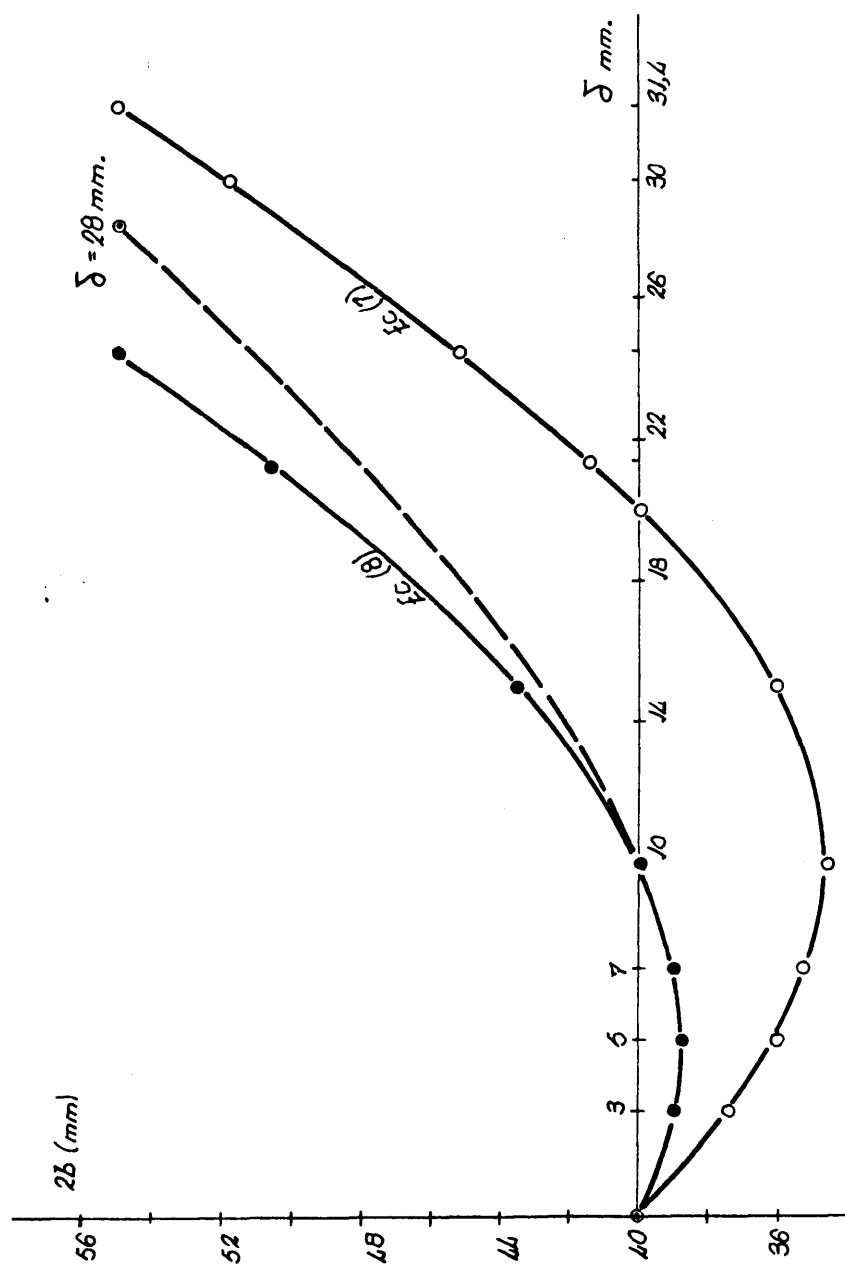


Fig.15 Deslizamiento de una probeta en función del recorrido del martillo.

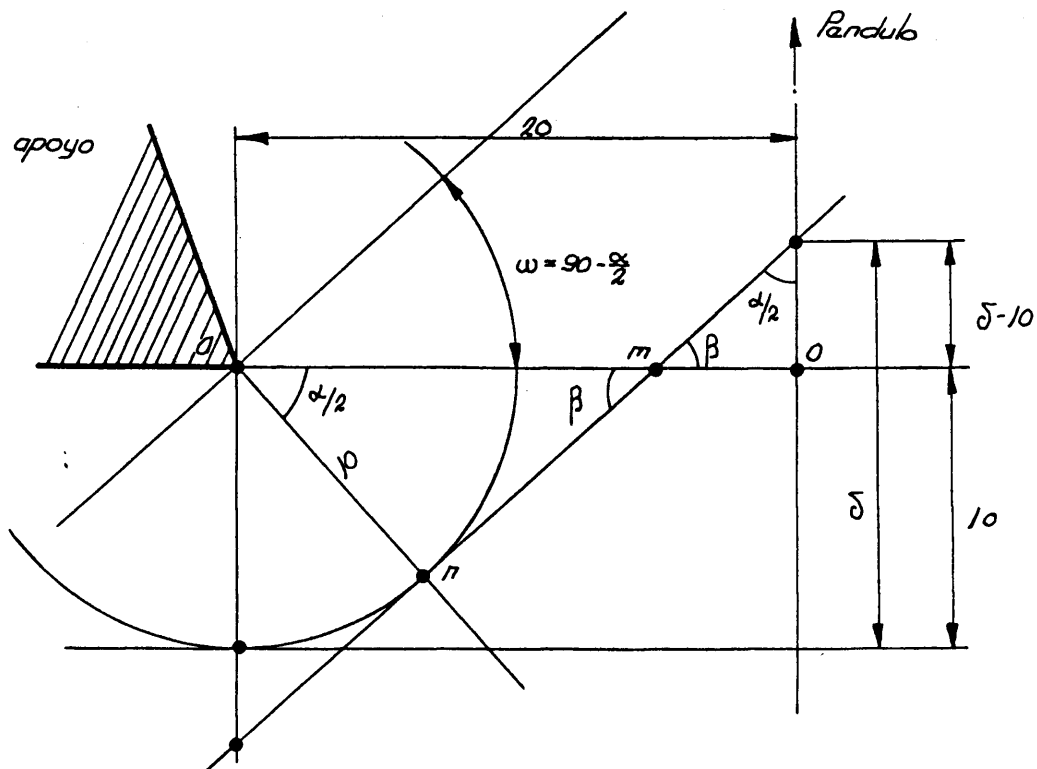


Fig.16 Dibujo esquemático en el que se consideran las variables que intervienen en el giro de una probeta, durante un choque.

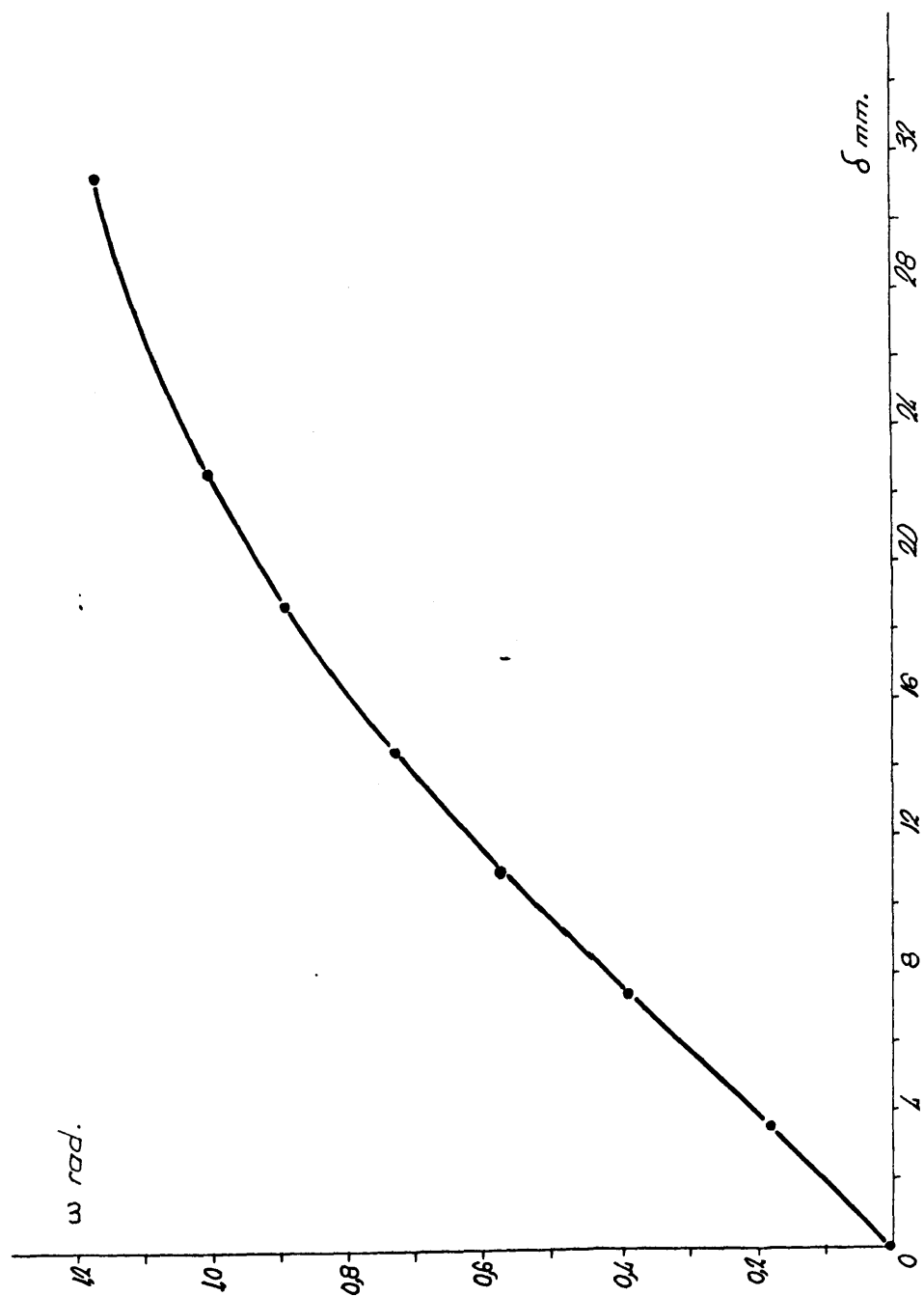


Fig.17 Representación de la función que relaciona el giro de media probeta con el recorrido del martillo.

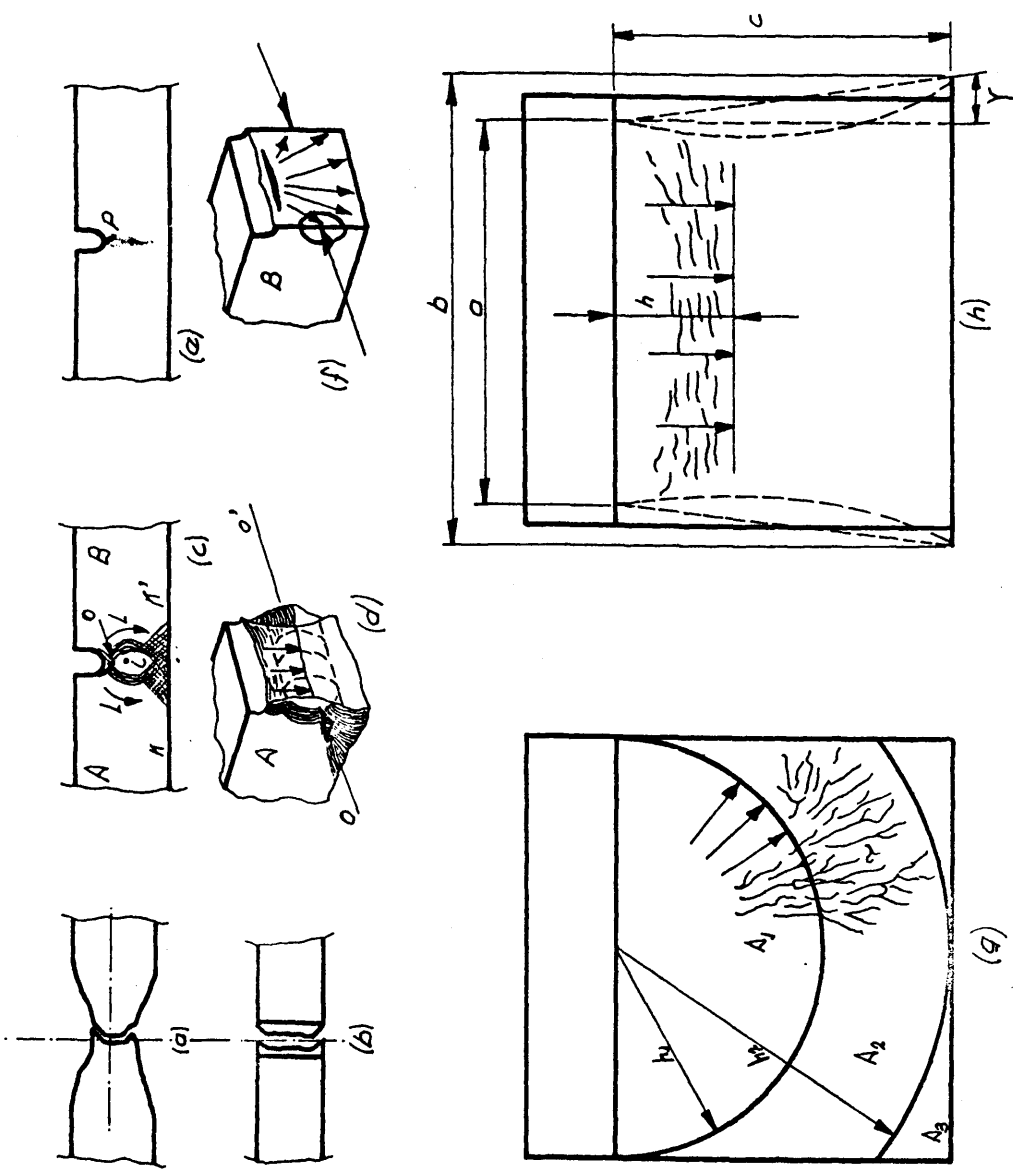


Fig.18 a). Fractura de copa y cono. b). Vista superior de una probeta de resiliencia rota. c). Zonas de deslizamiento en una probeta Mesnager. d). Aspecto de una fractura tenaz y de la evolución del frente de grieta. e). Aparición de una grieta correspondiente a una cisión máxima. f). Aspecto de una fractura frágil, direcciones de propagación del frente de grieta. g). y h). Evolución de frentes de grieta frágiles y tenaces.

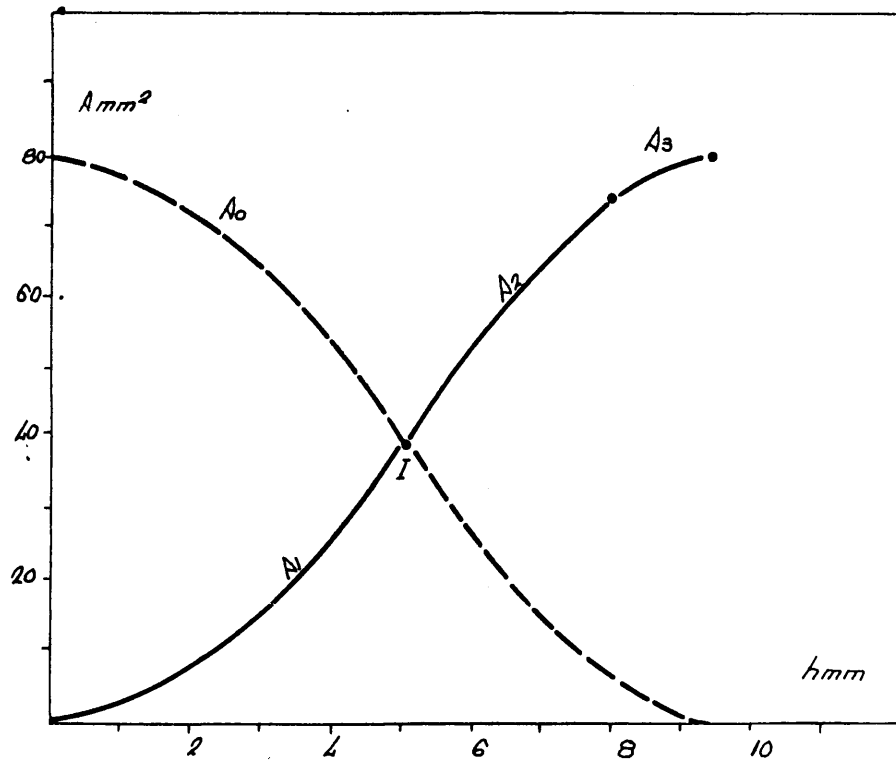


Fig.19 Tramos de curva: A_1 , A_2 y A_3 de superficie de fractura en función de la longitud de la grieta. Curva A_0 , sección no rota frente a la profundidad de la grieta.

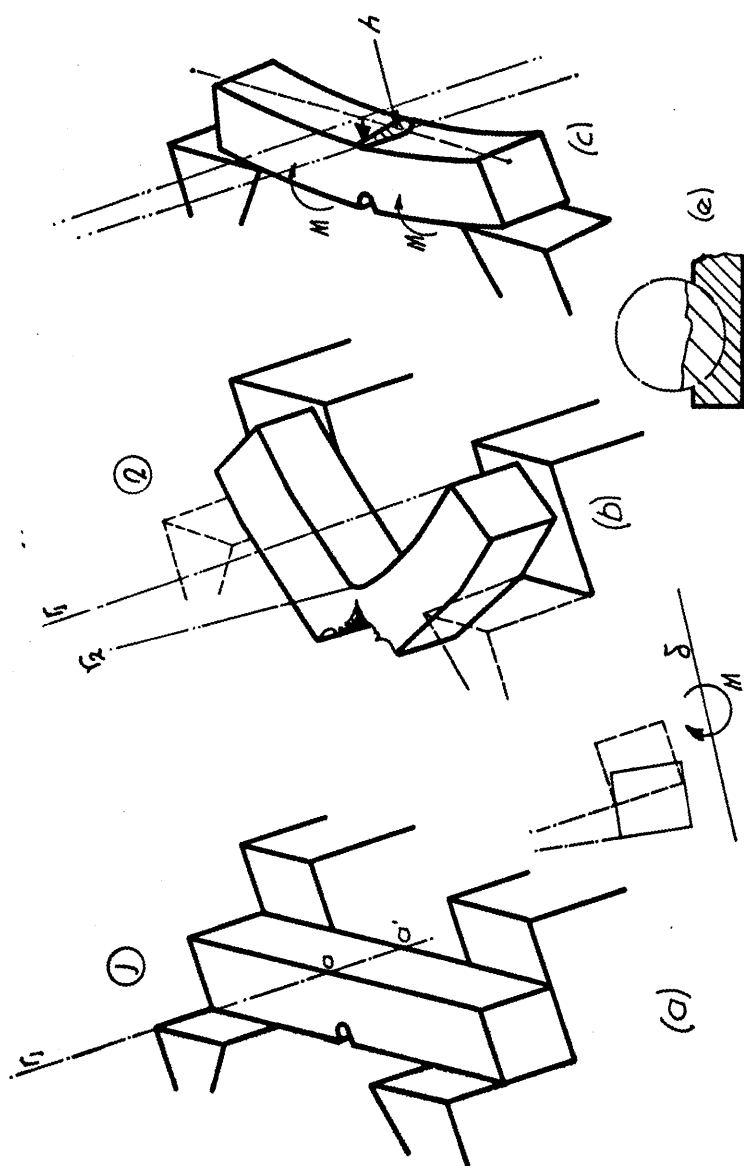


Fig. 20 Memento que el martillo imprime a la probeta en el plano de la entalla, dando lugar a una torsión en el plano de la misma.

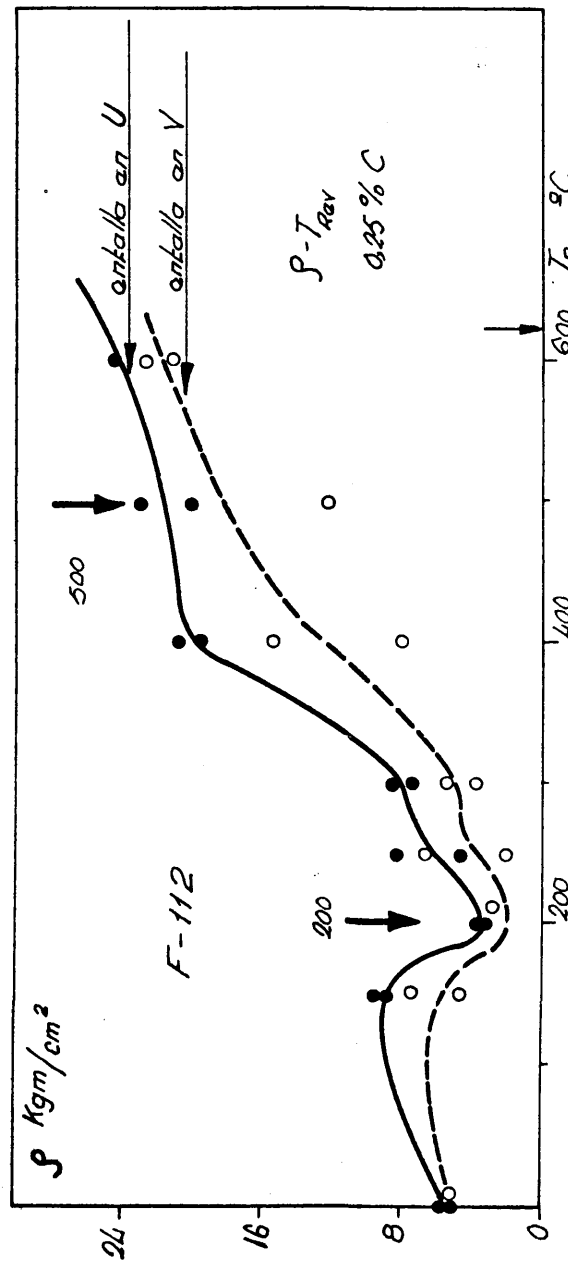


Fig. 21 Curvas de Resiliencia-Temperatura de revenido. Los valores Charpy en "V" son menores que los valores obtenidos con probetas entalladas en "U". Ambas curvas presentan la misma tendencia.

IV.- EXAMEN DINAMICO-ENERGETICO DEL ENSAYO CHARPY CONVENCIONAL:
DEDUCCION DE RELACIONES ENTRE PARAMETROS DE CHOQUE.

4.1.- CONSIDERACIONES DINAMICAS SOBRE EL ENSAYO CHARPY:

La energía que un péndulo Charpy puede aplicar a una probeta, depende de la energía potencial gravitatoria V' , de su martillo (sistema móvil), que está rígidamente ligado al eje de giro de la máquina de ensayo.

La componente radial del peso del martillo, siempre es perpendicular a la trayectoria del mismo, por lo que dicha componente no realiza trabajo sobre la probeta. En la práctica del ensayo, el martillo cae desde una altura h , respecto a otra h_0 , de colocación de la probeta, ambas a su vez por encima de una altura que corresponde a la de máxima energía cinética del martillo, en caída libre.

Siendo: M = la masa del martillo.

g = aceleración de la gravedad.

E_g = energía aplicada, leída en el péndulo.

E_f = energía que conserva el martillo después de un choque con rotura.

E_a = energía perdida por el martillo en el choque.

El ensayo de resiliencia se basa en:

$$V' = Mg (h-h_0) = \frac{1}{2} Mv_0^2 = E_g$$

$$V_f' = Mg (h_f-h_0) = \frac{1}{2} Mv_f^2 = E_f$$

Siendo V'_f , la energía potencial que conserva el martillo después del choque; v_f , la velocidad final, y $h_f < h$; Fig. 22. (page 120)

La energía perdida por el martillo será:

$$E_a = V' - V'_f = Mg (h - h_f) = E_g - E_f$$

La máquina Charpy da directamente dicha energía, E_a ; sin embargo y tal como se admite en el ensayo Charpy, la energía perdida por el martillo no es necesariamente - en ningún caso- la energía absorbida en la deformación y rotura de la probeta, si no que siempre van asociados al choque otros mecanismos que también absorben energía y que en definitiva imposibilitan atribuir toda la energía que cede el martillo a la que absorbe la probeta, $-E_a-$.

El ensayo Charpy, sin embargo, juzga así la energía absorbida en el choque y rotura de la probeta según:

$$E_a = E_g - E_f$$

Mucho parece- ante la imposibilidad de evaluar-, no tener en cuenta vibraciones de la propia máquina de ensayo, reconociendo que ha de estar muy bien cimentada. Resultaría muy difícil evaluar otras pérdidas de energía, pero para probetas especialmente de elevado límite elástico y fractura apreciablemente frágil, los trozos de la probeta, salen después de la rotura animados de gran velocidad, de tal manera que pueden llevar una energía cinética de hasta 1 kgm. según se ha observado.

En definitiva, tal como está concebido el ensayo Charpy, necesariamente ha de dar valores de resiliencia por exceso, en los materiales con él ensayados. Si este exceso fuera debido a los mismos mecanismos, la cifra de resiliencia, aunque no sería una respuesta fiel de una propiedad intrínseca del acero, conservaría al menos su valor comparativo, lo que es difícil que realmente ocurra, quedando el ensayo Charpy calificado únicamente como un ensayo de "exclusión".

Cuando el martillo entra en contacto con la probeta, en h_0 , (y en el caso de nuestra máquina Charpy), lo hace a un ángulo que forma 17° con la vertical, lo que hace que el choque no comience en la posición de mínima energía potencial del martillo.

Nuestra máquina Charpy posee un martillo instrumentado de 2,0 UTM, o sea, de 20 kg. de peso. Según la escala del aparato se puede aplicar una carga máxima de 30 kgm. lo cual indica que la altura máxima de caída será de

$$30 = 20 \cdot h \quad ; \quad h = 1,50 \text{ m.}$$

y el diagrama energético del péndulo será una recta $V' = (Mg) \cdot h$. en función de la altura, la cual pasa por el origen, Fig. 23. El recorrido del martillo, δ , durante el tiempo que ejerce fuerza sobre la probeta, es de unos 30 mm. Para una probeta de gran resiliencia, el arco OA corresponde a un ángulo de giro del brazo del péndulo de unos $1,8^\circ$ para 0,95 m. de brazo, con lo que tal arco se puede sustituir por una cuerda o tangente, adoptando entonces durante el choque una trayectoria rectilínea,

Fig. 24. El descenso del martillo durante el choque, h_0^1 , valdrá:

$$h_0^1 = 30.(\text{sen } 17).10^{-3}\text{m} = 0,009 \text{ m.}$$

y

$$Mgh^1 \approx 2.9,8.0,01 \leq 0,2 \text{ kgm.}$$

con lo que también se puede despreciar, dado que un recorrido de 30 mm. sólo se da en probetas de gran resiliencia, y sería un error relativo bajo, habiendo por otra parte causas de error más importantes, no identificadas.

El martillo, como péndulo físico, posee su centro de gravedad en el borde de su cuchilla con la que golpea a la probeta. Puesto que la masa de la probeta es muy pequeña comparada con la del martillo, se tiene:

$$\frac{m_p}{M} \approx \frac{1}{500}$$

Siendo (m_p) y (M) las masas de la probeta y el martillo con lo que la masa de la primera es despreciable frente a la de la segunda.

La velocidad con la que el martillo entra en colisión con la probeta se calcula de la energía potencial del mismo, y que corresponde a una energía aplicada que se lee en la regleta de la máquina, E_g :

$$E_g = \frac{1}{2} M v_o^2 \quad v_o = \sqrt{\frac{2E_{gp}}{M}}$$

Conocida en cada caso y de antemano la velocidad con que va a entrar en contacto el martillo con la probeta, según la energía seleccionada para el ensayo, conviene volver sobre el hecho de que la trayectoria en el choque se puede considerar como rectilínea, contenida en el plano vertical de giro del martillo y con una inclinación de 17° por debajo de la horizontal de h_o .

En estas condiciones muy aproximadas, únicamente existe una componente del vector cantidad de movimiento en la mencionada dirección rectilínea, según el eje R del sistema R-S que va le en su instante inicial Mv_o , Fig. 25.

En el choque con probetas tenaces, se da la condición de que el martillo se mueve ligado a la probeta ejerciendo fuerza continuamente sobre ella. En probetas elásticas y fragilizadas, sólo dura el contacto hasta que comienza la propagación de una grieta en la probeta, después de lo cual, la velocidad de rotura es mayor que la del martillo, separándose de éste y saliendo los dos trozos finalmente despedidos, por la devolución de la energía elástica acumulada en los apoyos de la máquina que se analiza más adelante.

La componente inicial de la cantidad de movimiento del martillo (Mv_o), experimenta en el choque una disminución (Mv_f) quedando con una cantidad, (Mv_f). Todos los vectores tienen la dirección del 17° por debajo de la horizontal y

contenidos en el plano de giro del martillo. Esta disminución de (Mv) se produce en un intervalo de tiempo de milisegundos (Δt) , pero puesto que las fuerzas con que se opone la probeta al martillo, o su fuerza resultante, no es constante, no se puede conocer en función del tiempo la cantidad (Mv_i) , pero sí una variación total de la cantidad de movimiento que dividida por el tiempo que dura el choque, nos proporcionará una fuerza media ejercida por el martillo, según:

$$f_m = \frac{\Delta(Mv)}{\Delta t} ; F_i = \frac{P_i}{t_i}$$

Esta fuerza tiene la dirección de la trayectoria rectilínea adoptada, y contenida en el plano de giro, con lo que F_y y F_z , así como v_y y v_z se consideran nulas.

Resulta que los valores instantáneos de la fuerza ejercida por el martillo, F_i , dentro del intervalo, Δt , no pueden ser conocidos por desconocerse el valor de P_i a t_i . En el ensayo Charpy únicamente se puede calcular: v_o , v_f e Δv , siendo conocidas m_p y M .

Los demás parámetros del choque son desconocidos, así como los valores instantáneos en el intervalo Δt ; por lo que hasta aquí, con el péndulo Charpy, hemos de contentarnos con determinar magnitudes integrales o medias durante el tiempo que dura el choque, si se pudiera medir éste. Conocidos v_o y v_f , podemos calcular las variaciones de la cantidad de movimiento y el trabajo ejercido - TOTALES -, pero al desconocer Δt y δ no podemos evaluar ni siquiera las fuerzas medias en función del tiempo, ni del espacio recorrido por el martillo, aunque

se conocen $\Delta(Mv)$, trabajo; y por lo tanto, impulso mecánico y pérdida de la energía cinética del martillo.

4.2.- ENERGIA CINETICA DE UNA PROBETA ROTA:

Ciertas partes del equipo, como la cuchilla del martillo y apoyos de la máquina Charpy, sufren deformaciones elásticas en el choque almacenando energía hasta un máximo, que corresponde a la fuerza máxima ejercida por el martillo sobre la probeta. Una vez que la grieta en ésta progresa, dicha fuerza disminuye y estas energías elásticas se van descargando en la probeta a medida que baja la fuerza a cero y finaliza la rotura. Tal es el caso de probetas tenaces. En probetas de un límite elástico dinámico elevado y fragilizadas ocurre que cuando se alcanza una fuerza máxima la velocidad de propagación, de la grieta que se origina, es muy grande y simultáneamente se descargan las energías elásticas almacenadas.

Se piensa que la energía elástica acumulada en los apoyos del péndulo es la que impulsa a la probeta, en un sentido opuesto al del movimiento del martillo, saliendo los dos trozos de la probeta despedidos.

Se observaron algunos casos en que un trozo de probeta chocaba en una plancha-pared, a 3m del martillo y a una altura sobre la de los apoyos de unos 0,5 m. y separado este impacto aproximadamente en algo más de 1 m. del plano de giro del martillo.

Se observó igualmente que uno de los dos trozos, salía con gran velocidad mientras que el otro no. Esto hace pensar que por la asimetría de la rotura, aquel trozo absorbió la mayor parte de la energía elástica.

Para evaluar esta energía cinética que es parte de la que pierde el martillo, se presentan en la Fig. 26, las variables a considerar y que intervienen, que son las componentes, v_x , v_y , v_z de v_{O_1} ; los ángulos α , β y γ cuyos cosenos son los directores del vector v_{O_1} ; el ángulo δ , que este vector forma con un plano (zx) a la altura de los apoyos y una serie de datos medidos correspondientes al punto de impacto del trozo de probeta, como O_1Q , OP , QP , y QC_1 . El origen del sistema cartesiano x , y , z , o sea, O_1 , se considera equivalente al O , situado en el plano de giro del martillo. Dado que OO_1 es muy pequeño comparado con O_1Q y OP ; O_1 y O se consideran equivalentes a estos efectos. También se considera que O está en el centro de gravedad de la probeta en reposo, pues la flecha que experimentan estas probetas es del orden de un milímetro.

Un factor importante a considerar es que puesto que el martillo entra en contacto con la probeta en una dirección que se prolonga a 172° por debajo de la horizontal de los apoyos que soportan a la probeta en un ángulo recto de lados, paralelo y perpendicular a esta dirección, parece lógico admitir que la dirección de las reacciones elásticas es la misma, es decir, opuesta a la dirección del martillo a 172° por encima de la horizontal (ángulo δ , de la Fig. 26). Si los trozos, al ser despedidos tropezaran con el martillo o partes del equipo, dejarían huellas apreciables y por otra parte alcanzaría puntos menos lejanos. A parte de reconocerse tales hechos, al menos se puede aproximar un valor para la energía cinética de los trozos de probeta. De todas formas el alcance del trozo de probeta, reflejado en su energía cinético de salida, representa

una energía que aunque ha sido cedida por el martillo, no ha sido absorbida por la probeta .

De la Fig. 26 , se tiene

$$OQ = l = v_{01} \cdot \cos \delta \cdot t$$

$$QC_1 = y = v_{01} \cdot \sin \delta \cdot t - \frac{1}{2} g t^2$$

$$t = \frac{l}{v_{01} \cdot \cos \delta} ; \quad t^2 = \frac{l^2}{v_{01}^2 \cdot \cos^2 \delta}$$

$$y = l \operatorname{tg} \delta - \frac{g l^2}{2 v_{01}^2 \cdot \cos^2 \delta}$$

$$v_{01} = l \sqrt{\frac{g}{l \cdot \sin 2\delta - 2 \cdot y \cdot \cos^2 \delta}}$$

Podemos evaluar la energía cinética de un trozo de probeta, considerando que ha absorbido la totalidad de la energía cinética, con una masa (m) de:

$$m = 2,15 \cdot 10^{-2} / 9,8 \text{ UTM.} \quad \delta = 17^\circ$$

$$x = 3 \text{ m.}$$

$$y = 0,5 \text{ m. (a un metro del suelo)}$$

$$z = 1 \text{ m.}$$

$$l = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$l = 3,16 \text{ m.} ; \quad l^2 = 10$$

$$\cos 17^\circ = 0,956$$

$$\cos^2 17^\circ = 0,914$$

$$\sin 34^\circ = 0,560$$

$$v_{01} = 12,2 \text{ m/s.}$$

$$E_{\text{cin.}} = \frac{1}{2} (2,15 \cdot 10^{-2} / 9,8) \cdot 12,2^2 = 0,33 \text{ Kgm./2 .}$$

En probetas con límites generales y cargas dinámicas máximas muy elevadas, como se presentan en aceros para muelles templados, esta energía cinética puede tomar todavía valores más altos.

4.3.- RELACION ENTRE LAS ENERGIAS APLICADAS Y LAS ENERGIAS CHARPY ABSORBIDAS:

Durante el choque el martillo sufre una pérdida continua de velocidad a través del recorrido en el que ejerce fuerza sobre la probeta.

La variación de velocidad en este intervalo de tiempo que dura el choque es una función analíticamente desconocida, que depende de la respuesta de la probeta, sin embargo, las lecturas de la regleta de la máquina Charpy nos permiten conocer v_o y v_f .

: De todos los valores que toma la velocidad, desde que comienza hasta que finaliza el choque con rotura de la probeta, se define un valor medio de velocidad según:

$$v_m = \frac{1}{\Delta v} \int_{v_o}^{v_f} v dv ; \quad v_m = \frac{1}{2\Delta v} (v_o^2 - v_f^2) \quad (18)$$

donde:

v_o = velocidad con la que el martillo llega a la probeta.

v_f = velocidad del martillo cuando finaliza el choque.

$\Delta v = v_o - v_f$ (Véase Fig. 27).

donde:

Δv = pérdida de velocidad del martillo debida al choque.

Por encima de la energía que absorbe una probeta se pueden aplicar cargas o energías E_{g_i} , crecientes, originando como es obvio siempre la rotura.

Al elegir estas diferentes energías que se aplican a la probeta, ocurre que el martillo llegará también a ella, a velocidades diferentes; o sea, para las $E_{g_i} > \text{Energía de rotura}$, el martillo llega a la probeta a las correspondientes v_{o_i} diferentes.

Experimentalmente se ha visto que con una serie de probetas del mismo acero, igualmente tratadas y en el mismo estado metalúrgico (tal como se preparan para la determinación de una curva de transición), si se rompen todas a la misma temperatura ambiente, pero con energías aplicadas crecientes (y por encima de la energía suficiente para romper a la probeta), dentro de las mismas condiciones en que se ejecuta el ensayo, se ve que cuando se rompen el martillo les ha comunicado una energía (que dentro de una cierta dispersión razonable y propia del ensayo o del material), presentan unas energías absorbidas, leídas en la máquina, similares.

de la ec. 18

$$v_m = \frac{1}{2\Delta V} (v_o^2 - v_f^2)$$

resulta

$$M v_m \Delta V = \frac{1}{2} M (v_o^2 - v_f^2) = E_a \quad (19)$$

donde el segundo miembro es la energía cedida por el martillo en la deformación y rotura de la probeta y ha de ser independiente de la energía aplicada, siempre que sea mayor que la mínima necesaria para la rotura de la probeta.

Si a dos probetas que van a absorber la misma energía, $E_1 = E_2$, se les aplica una carga $E_{g1} > E_{g2}$, el martillo alcanzará, en su caída, a las probetas, con las velocidades

$$v_{o1} \quad \text{y} \quad v_{o2}$$

y después de la rotura estará animado de

$$v_{f1} \quad \text{y} \quad v_{f2}$$

siendo $(v_{o1} > v_{o2})$ y $(v_{f1} > v_{f2})$

Entonces las variaciones de velocidad del martillo serán:

$$\Delta v_1 = v_{o1} - v_{f1} \quad \text{é} \quad \Delta v_1 \neq \Delta v_2$$

$$\Delta v_2 = v_{o2} - v_{f2} \quad \text{é} \quad M\Delta v_1 \neq M\Delta v_2$$

$$\text{pero, } E_1 = E_2 = \frac{1}{2} M (v_{o1}^2 - v_{f1}^2) = \frac{1}{2} M (v_{o2}^2 - v_{f2}^2)$$

según se definió v_m resulta que vale:

$$v_m = \frac{v_o + v_f}{2}$$

Entonces

$$v_{m1} = \frac{v_{o1} + v_{f1}}{2} ;$$

$$v_{m1} \neq v_{m2}$$

$$v_{m2} = \frac{v_{o2} + v_{f2}}{2} ;$$

$$Mv_{m1} \neq Mv_{m2}$$

De la ec-13, y puesto que E_1 no ha de variar con E_{g1}

$$Mv_{m1} \Delta v_1 = M \frac{(v_{o1} + v_{f1})(v_{o1} - v_{f1})}{2} = \frac{1}{2} M(v_{o1}^2 - v_{f1}^2) = E_1$$

$$Mv_{m2} \Delta v_2 = M \frac{(v_{o2} + v_{f2})(v_{o2} - v_{f2})}{2} = \frac{1}{2} M(v_{o2}^2 - v_{f2}^2) = E_2$$

y

$$E_1 = Mv_{m1} \Delta v_1 = Mv_{m2} \Delta v_2 = E_2$$

Con lo que $(Mv_{mi} \Delta v_i)$ no varía con E_{gi} , cuando se rompen probetas que absorben todas la misma E_a , y las velocidades de aplicación de la carga son del mismo orden.

Si se elimina Δv , en función de las energías leídas en la regleta de la máquina de ensayo se tiene:

$$v_o = \sqrt{\frac{2E_g}{M}}$$

$$v_f = \sqrt{\frac{2E_f}{M}}$$

la energía final E_f será la leída en la máquina como energía aplicada menos la cedida por el martillo o energía absorbida, E_a . En realidad,

$$E_f = E_g - (E'_a + E_{vib.} + E_{cin.} + E_Q + \dots)$$

donde E'_a es la energía que realmente absorbe la probeta, siendo $E_{vib.}$ la energía de vibración de la máquina en el choque; $E_{cin.}$ la posible energía cinética de los trozos de la probeta y E_Q , la energía calorífica, etc....

El ensayo Charpy, admite que la energía perdida por el martillo es la absorbida por la probeta.

Representando por E_a a la energía cedida por el martillo y por lo tanto a la absorbida por la probeta,

Resulta

$$E_f = E_g - E_a$$

se tiene

$$v_f = \sqrt{\frac{2E_f}{M}} = \sqrt{\frac{2}{M}} \sqrt{E_g - E_a}$$

y de

$$\Delta v = v_o - v_f$$

$$\Delta v = \sqrt{\frac{2}{M}} \left(\sqrt{E_g} - \sqrt{E_g - E_a} \right)$$

Sustituyendo en la ec-19, este valor de Δv ,

$$E_a = M v_m \cdot \Delta v$$

$$E_a = (M v_m) \left[\sqrt{\frac{2}{M}} \left(\sqrt{E_g} - \sqrt{E_g - E_a} \right) \right] \quad (20)$$

$$y \quad v_m = \frac{v_o + v_f}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{M}} \left(\sqrt{E_g} + \sqrt{E_g - E_a} \right)$$

$$v_m = \sqrt{\frac{1}{2M}} \left(\sqrt{E_g} + \sqrt{E_g - E_a} \right) \quad (21)$$

La expresión (20) indica que una probeta ensayada que haya absorbido una energía E_a , bajo una carga aplicada E_g , le corresponde un valor de v_m que hace posible que se puedan igualar ambos miembros. No se trata pues de hacer explícito E_a y pensar que de esta manera se pueden calcular las energías que una probeta va a absorber en su rotura, conociendo la carga que se aplica, porque ambas variables no tienen posible relación íntima, sino que de consideraciones

energéticas se llega a - UNA CONDICION QUE SE HA DE CUMPLIR -

en el choque con rotura de una probeta. Puesto que

$v_{m1} = \frac{v_{o1} + v_{f1}}{2}$, es evidente que este parámetro, tomará nu-

merosos valores según las E_{a1} que absorben las probetas y

las E_{g1} que se apliquen para romperlas y que al depender de

$v_{o1} = \sqrt{\frac{2E_{g1}}{M}}$ y de $v_{f1} = \sqrt{\frac{2}{M}} \sqrt{(E_{g1} - E_{a1})}$, dependen de las

E_{a1} y de las E_{g1} . Esta dependencia se pone de manifiesto en la expresión (21).

Por otra parte, en un péndulo instrumentado electrónicamente mediante extensímetros eléctricos cementados a la cu

chilla del martillo y calibrado convenientemente, es posible el registro oscilográfico de curvas $P_i = P_i(t)$, en el intervalo de tiempo que dura el choque con rotura, midiéndose el mismo con la base de tiempos del oscilógrafo.

Estas curvas fuerza-tiempo o deceleración tiempo, al ser integradas gráficamente, nos proporcionan las curvas velocidad-tiempo, Fig. 28.

En esta curva integral, se conocen las ordenadas máxima y mínima, v_o y v_f , por lo tanto se puede calibrar el eje de ordenadas en unidades de velocidad.

4.4.- CAMPO DE VALORES DEL PARAMETRO v_m : PARAMETRO UTILIZADO EN LAS EXPERIENCIAS DE ROTURA:

Las energías máxima y mínima que se pueden aplicar a una probeta en el péndulo Charpy con el que se realizaron las roturas varían de 0,25 kgm, a 29,6 kgm, de una manera discontinua. Las energías que una probeta puede absorber siempre serán menores o a lo sumo iguales a las que se aplican, y por lo tanto, el martillo teóricamente, puede ceder desde cero a 29,6 kg., (El empleo de cuñas, Fig. 29, permite aplicar las energías deseadas).

Para la máxima energía aplicada de 29,6 kgm. la probeta puede absorber: toda la energía, una energía muy baja o un valor intermedio. Análogamente en el supuesto de que aplicando una energía mínima posible con la máquina, de 0,25 kgm. se rompiera la probeta, también se puede admitir que la energía absorbida fuera: casi nula $< E_{ab} < 0,25$, o que fuera nula. Estos supuestos de absorción nula se hacen con el fin de ver para ellos cuanto vale v_m , ya que hay que fijar un mínimo valor de energía absorbida para conocer juntamente con el otro dato- E_g - el campo de los valores que puede tomar v_m , Fig. 30.

Para $E_g = 29,6$ kgm. y

$$E_{a1} = 0 \quad ; \quad \underline{v_{m1} = 5,44 \text{ m/s}}$$

$$E_{a2} = 29,6 \quad ; \quad v_{m2} = 2,72 \text{ m/s}$$

Para $E_g = 0,25 \text{ kgm. y}$

$$E_{a_3} = 0, \quad v_{m_3} = 0,5 \text{ m/s}$$

$$E_{a_4} = 0,25 \quad ; \quad \underline{v_{m_4} = 0,25 \text{ m/s}}$$

En definitiva el parámetro v_m puede tomar todos los valores numéricos comprendidos entre 0,25 y 5,44 m/s para todos los valores de E_g según $0,25 \leq E_g \leq 29,6 \text{ kgm y}$
 $E_{a_i} \leq E_{g_i}$.

Para comprobar la relación energética de la ec.(20) se han preparado probetas de distintos aceros y con diferentes tratamientos para conseguir toda una gama de valores de E_a .

Los valores de E_g aplicados fueron seleccionados de forma que con series de probetas igualmente tratadas, se consigieran pares de valores E_g y E_a que cumplieran la ec.(20) para un valor del parámetro $v_m = 2,314 \text{ m/s}$.

4.5.- ANALISIS Y REPRESENTACION DE LA FUNCION $E_a = f(v_m)$.

En la condición que expresa la relación que se ha de cumplir en el choque, entre E_g , E_a y v_m , ec- 20, haciendo explícita E_a , resulta:

$$E_a = 2 M v_m \sqrt{\frac{2E_g}{M} - v_m} \quad (22)$$

Expresando ahora la E_g , para las distintas E_a , en función del parámetro v_m , se tiene,

$$E_g = \frac{1}{8Mv_m^2} E_a^2 + \frac{1}{2} E_a + \frac{1}{2} Mv_m^2 \quad (23)$$

y dándole a esta parábola, la forma típica tenemos

$$8Mv_m^2 E_g = (E_a + 2 Mv_m^2)^2 \quad (24)$$

de la forma $4p(y-k) = (x-h)^2$

donde $p = 2 Mv_m^2$; $k = 0$

$$h = -2 Mv_m^2 ;$$

que sitúa el punto O' , Fig. 31.

Siendo las coordenadas del foco $F(0, 2 Mv_m^2)$ y la ecuación de la recta directriz $(y' = -2 Mv_m^2)$ paralela al eje x o eje de las E_a .

El nuevo eje, y' , en el que se encuentra el vértice de la parábola estará en O' , a

$$O' (0_1, -2Mv_m^2) \text{ de } -0-$$

Haciendo $x = E_a = -2Mv_m^2$ en la ec. 24, resulta que el vértice de la parábola posee una ordenada nula y es tangente al eje x , ó E_a , en una representación cartesiana (y, x) o (E_g, E_a) , las ordenadas en el origen valdrán de $E_a = 0$.

$$8Mv_m^2 E_g = (2Mv_m^2)^2$$

$$E_g = \frac{M}{2} v_m^2 = \frac{M}{2} v_{o1}^2 \quad (25)$$

respecto al primitivo sistema de referencia. En la Fig. 31, se representa la ecuación de la parábola con su foco, directriz, vértice (ordenada mínima), y ordenada en el origen, con su curvatura hacia arriba.

Únicamente tiene correspondencia con la realidad experimental la rama de parábola (TS) ya que la rama ($O'T$) supondría aplicar energías positivas y absorberse negativas.

Entonces únicamente se comparan los resultados experimentales con las particularidades del primer cuadrante. En él, la recta $E_g = E_a$, de $t_g = 1$, separa dos zonas: una rayada en la que no aparecerán puntos correspondientes a pares de valores E_g, E_a , de roturas ya que entonces $E_g < E_a$. Por encima de esta recta a 45°, (que pasa por el origen) y en el área compren

dida entre ella, el eje E_g , hasta R, (máxima carga aplicable) y la recta RS, estarán todos los pares de valores E_g y E_a con el correspondiente valor de v_m que representan a todas las roturas experimentales de probetas.

Existe un punto singular (N) en el cual la rama de parábola es tangente a la recta, por lo tanto

$$E_g = E_a$$

tendrá una solución común con:

$$8Mv_m^2 \cdot E_g = (E_a + 2Mv_m^2)$$

Esta solución es cuando $E_g = E_a = 2Mv_m^2 = PN$. En lo sucesivo cuando se analicen series de roturas experimentales, ya sabemos que los valores de E_g , E_a y v_m serán tales que los puntos (E_g y E_a) correspondientes a cualquier rotura con el equipo Charpy de 30 kgm. caerán en el triángulo OSR.

Tomando la serie de valores $v_m = 0,25; 1,98; 3,71; 5,44; y 2;314; 2,648; 2,972; 3;306 y 3,64 m/s.$, se intenta ver qué parábolas resultan y cómo se modifican los puntos (O'), (T) y (N) según los valores de v_m .

$$\text{Coordenadas de O' : } O'(0, -2Mv_m^2)$$

$$" \quad " \quad T : T \left(0, \frac{M}{2} v_m^2\right)$$

$$" \quad " \quad N : N \left(2Mv_m^2, 2Mv_m^2\right)$$

TABLA V

Nº de orden	v_m	0'0	OT	PN = MN
0	0,25	0,25	0,063	0,25
1	1	4	1	4
2	1,414	8	2,00	8
3	1,98	15,7	3,92	15,7
4	2,314	21,4	5,35	21,4
5	2,648	28,0	7,01	28,0
6	2,972	35,3	8,84	33,3
7	3,306	43,7	10,9	43,7
8	3,64	53,0	13,3	53,0
9	3,71	55,1	13,8	55,1
10	4,472	80	20	80
11	5,44	118,4	29,6	118,4

Ver Fig. 32, en ella están representadas las parábolas correspondientes a $v_m = 1$, hasta $v_m = 5,44$. Interesosa sólo considerar las ramas de parábola que pasan por el triángulo OSR, de la zona de roturas.

En la Fig. 33 se representan con detalle estas ramas de parábola así como la correspondiente a $v_m = 2,314$, que se usó para comprobar experimentalmente el grado de exactitud con que los resultados experimentales coinciden con la función que relaciona E_g , E_a y v_m . En la Fig. 33, se representa la recta OS, por debajo de la cual no existen pares de valores (E_a , E_g) que corresponden a roturas (ZONA DE EXCLUSION).

En el triángulo ORS es donde los pares de valores (E_a, E_g) coinciden con las energías absorbidas y aplicadas a las probetas que rompen (ZONAS DE ROTURAS). Las ramas de parábola representadas son los lugares geométricos de los pares de valores (E_a, E_g) que corresponden a probetas rotas con una velocidad media constante e igual para todas ellas.

4.6.- ENERGIA FINAL EN FUNCION DE E_a Y v_m .

De la expresión

$$E_f = E_g - E_a$$

y la ec.23, resulta la parábola

$$8Mv_m^2 E_f = (E_a - 2Mv_m^2)^2 \quad (26)$$

análoga a la ec. 24.

Las coordenadas del vértice, del foco y recta directriz, serán:

$$F(y,x) = F(2Mv_m^2, 0) \quad ; \quad y' = -2Mv_m^2$$

$$O'(y,x) = O'(0, 2Mv_m^2)$$

El vértice de O' de la familia de parábolas (parámetro, v_m), tiene una ordenada nula y es tangente al eje E_a .

Las coordenadas en el origen de esta familia de parábolas se deducen haciendo, en la ec.26, $E_a = 0$.

$$8Mv_m^2 E_f = (-2Mv_m^2)^2$$

$$(v_m)_{E_a=0} = \frac{2v_0}{2} = v_0$$

$$E_f = \frac{1}{2} M \cdot v_m^2 = \frac{1}{2} M v_o^2$$

Coincidirán con las de la familia de parábolas de la ec. 24.

En la Fig. 34 se representan estas parábolas. Los valores de v_m , usados en la representación, son los mismos que se usaron para la ec. 24.

Interesa representar la zona donde E_f , E_a y v_m , toman valores que corresponden a roturas (zona OUV). En la Fig. 35 se representa dicha zona, con ramas de parábolas correspondientes a la zona de rotura, para valores de v_m desde 1 a 5,44 m/s. Las rectas $E_{f_i} = E_{g_i} - E_{a_i}$ son los lugares geométricos de los tríos de valores E_g , E_a y E_f , que corresponden a cada rotura, y en su intersección con las ramas de parábolas, nos dan los cuatro datos correspondientes a una rotura, o sea, E_g , E_a , E_f y v_m .

En la Fig. 36, se ve que $E_f = f(E_a, v_m)$ nos permite leer, situando el punto en el plano de energías (OUV), los valores de E_g , E_a , E_f y v_m , conocidos dos de ellos.

4.7.- RELACION DE LA ENERGIA APLICADA A LA ABSORBIDA

Esta relación se puede examinar a partir de la ec. 16, denominando a la relación $E_g/E_a = u$, resulta

$$E_a (u) - \frac{1}{2} = \frac{E_a^2}{8Mv_m^2} + \frac{Mv_m^2}{2} \quad (27)$$

de la ec. 27, se ve que:

Asíntota (1) $E_a = 0$

Asíntota (2) Recta, $u = mE_a + n$

$$E_g / E_a = E_a / 8Mv_{m1}^2 + 1/2; (0 \leq m \leq 1)$$

Mínimo

$$E_a = 2 Mv_{m1}^2$$

En la Fig. 37, se representa la función $(E_g/E_a) = f(E_a)$ para el valor de $v_m = 2,314$ m/s, cuyas asíntotas son: $u = 0,0117 E_{ab} + 1/2$ y $E_a = 0$, según:

TABLA

Nº de orden	v_m	pendiente $\frac{E_g}{8Mv_m^2}$ de la Asíntota(2)	Mínimos $\frac{2Mv_m^2}{2}$	Asíntota (2)
0	0,25	1,00	0,25	$u = E_{ab} + 1/2$
1	1,00	0,063	4	$u = 0,063 E_{ab} + 1/2$
4	2,31	0,0117	21,4	...
11	5,44	0,0021	118,4	...

4.8.- LA FUNCION $E_g = f(E_a, v_m)$ PARA UN PENDULO INSTRUMENTAL
DO: INTERVENCION DE φ Y k .

La función $E_g = f(E_a, v_m)$, ya deducida (véase ec. 20), se puede obtener también igualando el impulso mecánico a la pérdida de la cantidad de movimiento del martillo, adoptando una fuerza y velocidad medias, durante el choque, según,

$$M \Delta V. v_m = f_m (t_f - 0) v_m = E_a$$

expresando ΔV en función de E_g y E_a , resulta

$$E_a = (M v_m) \sqrt{\frac{2}{M}} \left(\sqrt{E_g} - \sqrt{E_g - E_a} \right)$$

El factor $(M v_m)$ se puede expresar en función de la constante de calibrado, φ , y de la pendiente k , que resulta de la recta $\varphi = k.A_t$, cuando se representan pares de valores: (resiliencia-área bajo los pulsos) correspondientes a roturas con $v_m = C^{te}$, durante el choque. El valor de k ha de ser medido previa representación de pares de valores experimentales de φ y A_t a $v_m = C^{te}$. Expresando la pérdida de la cantidad de movimiento como un impulso, cuya fuerza y tiempo son recogidos en el oscilograma, despreciando la masa de la probeta respecto a la del martillo.

$$M \cdot \Delta V = f_m \cdot \Delta t = f_m \cdot t_f$$

$$f_m \cdot t_f = 2000 \Delta V$$

De la Fig. 38, considerando el pulso sin ampliar por (a) y tal como se registra, se tiene

$$A_t = OA \cdot AB$$

$$OA = \frac{r_m}{\varphi'} \text{ (cm)}; \quad AB = t_f = l_f \text{ (cm)}$$

Entonces,

$$\frac{r_m}{\varphi'} t_f = \frac{2000 \Delta V}{\varphi'} = A_t \text{ (cm}^2\text{)} \quad (28)$$

En la Fig. 38, una vez ampliado el pulso por (a) = 2,5 cm, resulta,

$$A_{ta} = A_t \cdot a^2$$

$$A_{ta} = \frac{2000 a^2 \Delta V}{\varphi'} \quad (29)$$

Más adelante se confirma experimentalmente que para un conjunto de pulsos que reúnen la condición de $v_m = 2,314 \text{ m/s} = c^{te}$, se cumple

$$\rho = \frac{E_a}{0,8} = k \cdot A_{ta} \quad (30)$$

donde:

$$k = 0,48 = c^{te}$$

Resulta de las ecs. 29 y 30,

$$E_a = \frac{1600 \cdot k \cdot a^2 \cdot \Delta V}{\varphi'}$$

y siendo,

$$\varphi' = \varphi \cdot a$$

$$E_a = \frac{4000 k \Delta V}{\varphi}$$

Expresando ΔV , en función de E_g y E_a ,

$$E_a = \frac{4000 k}{\varphi} \sqrt{\frac{2}{M}} \left(\sqrt{E_g} - \sqrt{E_g - E_a} \right) \quad (31)$$

La expresión (31) fue deducida para el caso particular de $v_m = 2,314$ para la cual $k = 0,48$; pero existen todos los pares de valores (k_i, v_{mi}) , correspondientes a la zona de roturas, para los cuales la forma de esta ecuación sigue siendo válida.

Esta nueva forma de la ecuación basada en características de un péndulo instrumentado nos permite conocer que:

$$\frac{4000 k_i}{\varphi} = M v_{mi} \quad (32)$$

siendo solamente variables v_{mi} y k_i .

Análogamente,

$$\frac{4000 \cdot k}{\varphi} = \frac{M}{2} \cdot \sqrt{\frac{M}{2}} \left(\sqrt{E_g} + \sqrt{E_g - E_a} \right) \quad (33)$$

4.9.- EXPRESION TEORICA PARA LA CONSTANTE DE CALIBRADO.

Teóricamente la constante de calibrado, φ , se puede calcular a partir de datos de roturas, sin que sea necesario realizar ningún experimento previo de calibrado, utilizando la ec. 32.

En la expresión

$$\varphi = \frac{4000 k}{v_m.M}$$

basta conocer los valores de la velocidad media del choque, v_m , y el valor de la constante k , que es la pendiente de la recta, resiliencia-área bajo los pulsos de probetas que han roto a la misma velocidad media, para que recogiendo una población de estos pares de valores se pueda hallar un valor estadístico de φ .

Para $v_m = 2,314$, el valor de la pendiente resiliencia-área bajo los pulsos de medidas experimentales fue: $k = 0,48$, con lo que:

$$\varphi = \frac{2000 \cdot 0,48}{2,314} = 415 \frac{\text{kg}}{\text{cm}}$$

Valor medido en el calibrado previo experimental y calculado aquí con datos de roturas. Por otra parte vimos como φ estaba influenciada por la tensión de alimentación al puente, V_o , análogamente la constante k también está influenciada por dicho voltaje. Esta influencia va implícita ya en el

valor experimental obtenido para k , y su dependencia analítica de dicho voltaje se ve, según

$$\varphi = \frac{4000}{V_o} + 127$$

$$\varphi = \frac{4000}{V_m \cdot M} k$$

de donde

$$k = \left(\frac{2}{V_o} + 0.064 \right) V_m \quad (34)$$

La Fig. 39 da los valores de k , en función de la tensión de alimentación al puente, para probetas que han roto a $V_m = C^{to} = 2,314$

Este procedimiento de cálculo exige que toda la energía cedida por el martillo haya sido absorbida por la probeta.

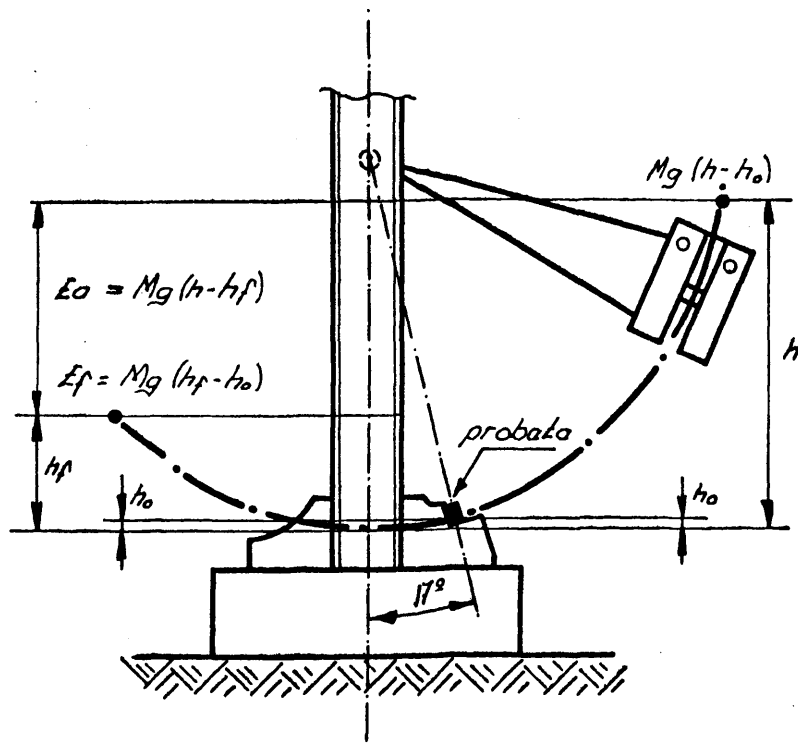


Fig. 22 Diagrama esquemático del funcionamiento de un péndulo Charpy.

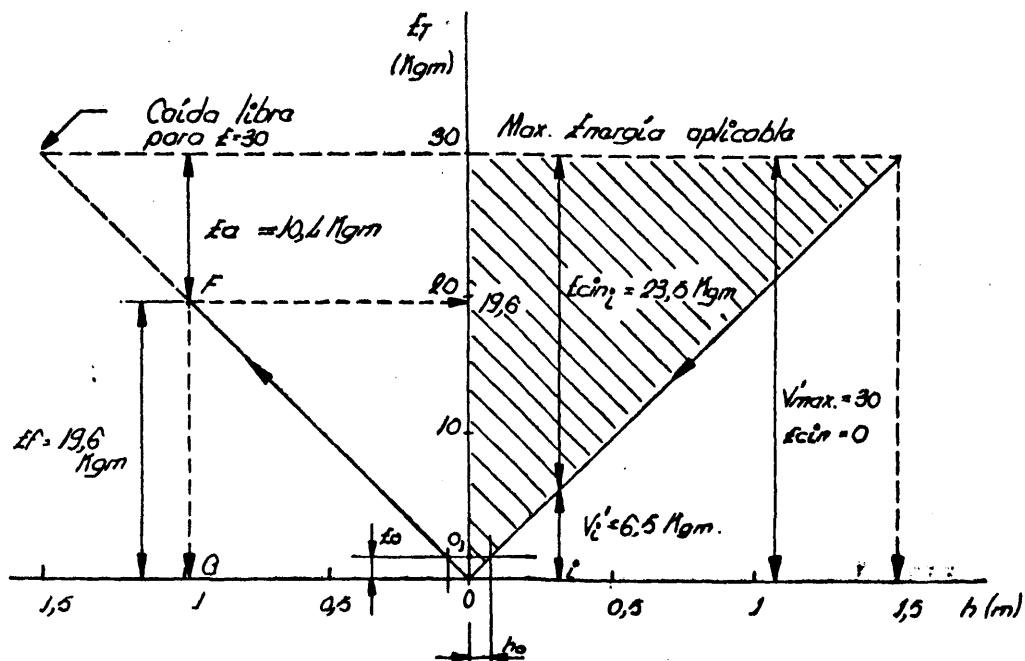


Fig. 23 Diagrama energético de un péndulo Charpy convencional.

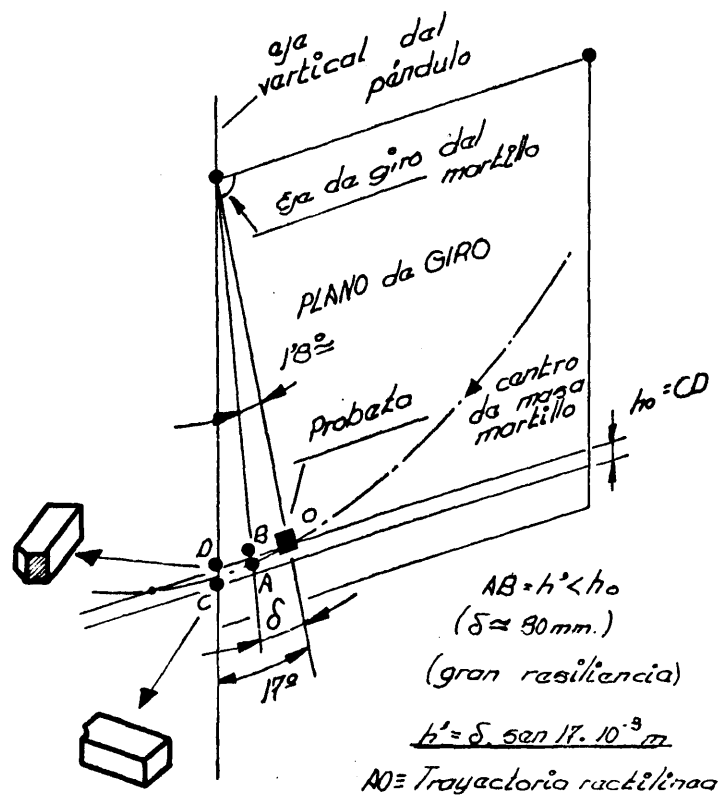


Fig.24 La trayectoria que describe el martillo durante el corto tiempo de acción sobre la probeta, es prácticamente rectilínea (OA).

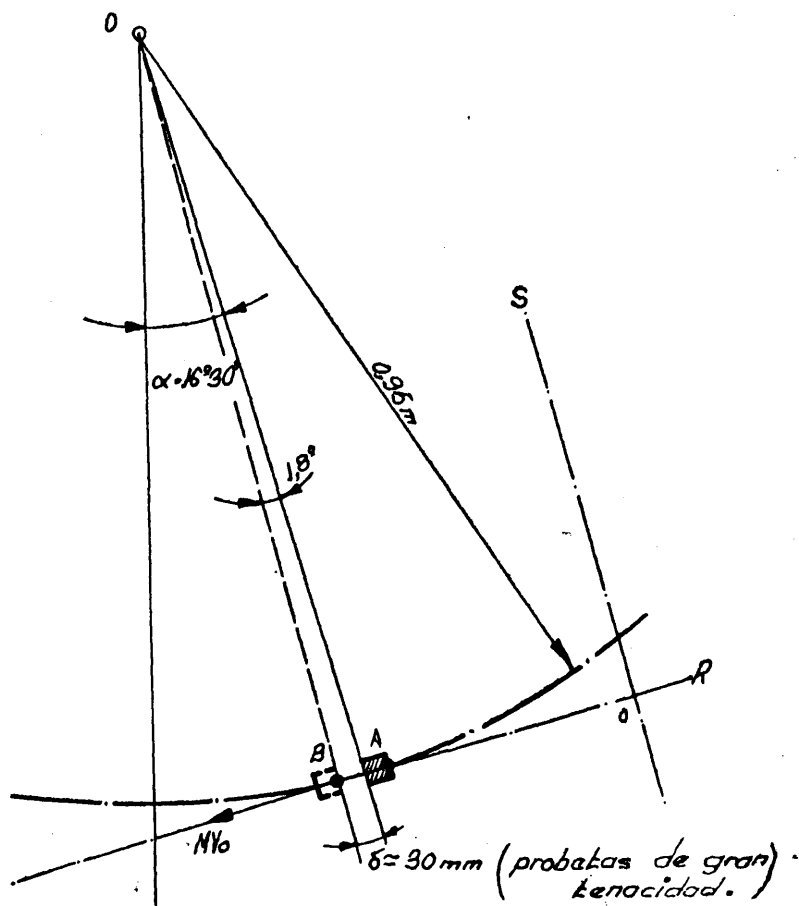
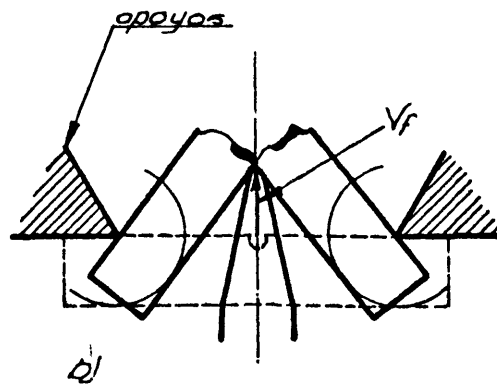
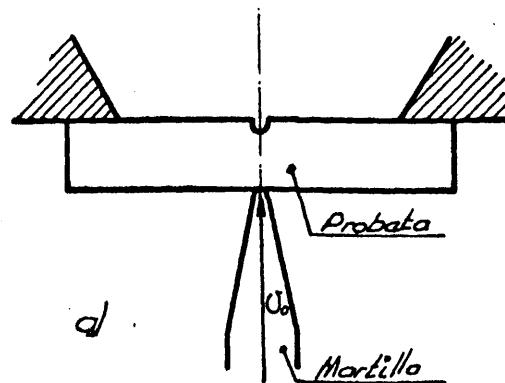


Fig. 25 El martillo alcanza a la probeta con un vector cantidad de movimiento (MV_0), que prácticamente no varía de dirección.



a) Instanta Inicial

b) " Final

Fig.27 a).El martillo alcanza a la probeta con una velocidad v_0 . Al finalizar el choque el martillo conserva una velocidad v_f .

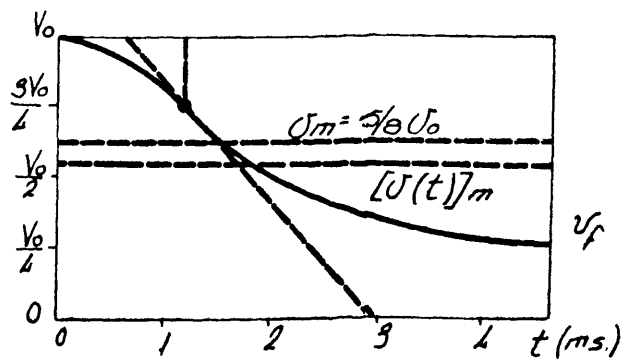
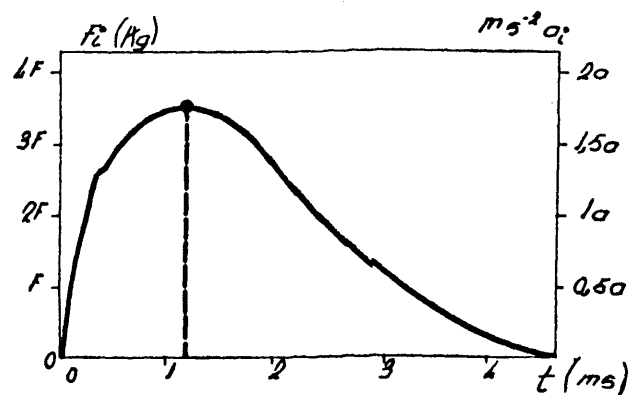


Fig. 28 Representación de un pulso
Fuerza-tiempo y de su pri-
mera curva integral: velo-
cidad del martillo en fun-
ción del tiempo.

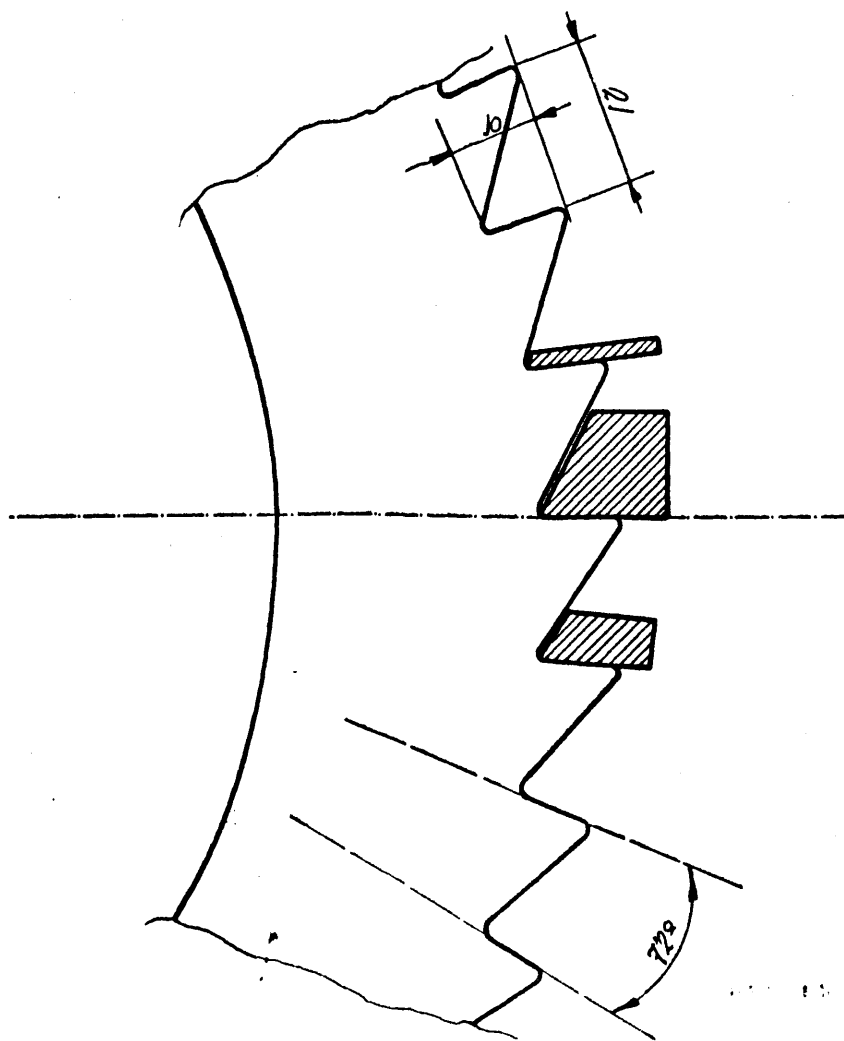


Fig.29 Ajuste de las energías aplicadas mediante el empleo de cuñas. (Péndulo Charpy)

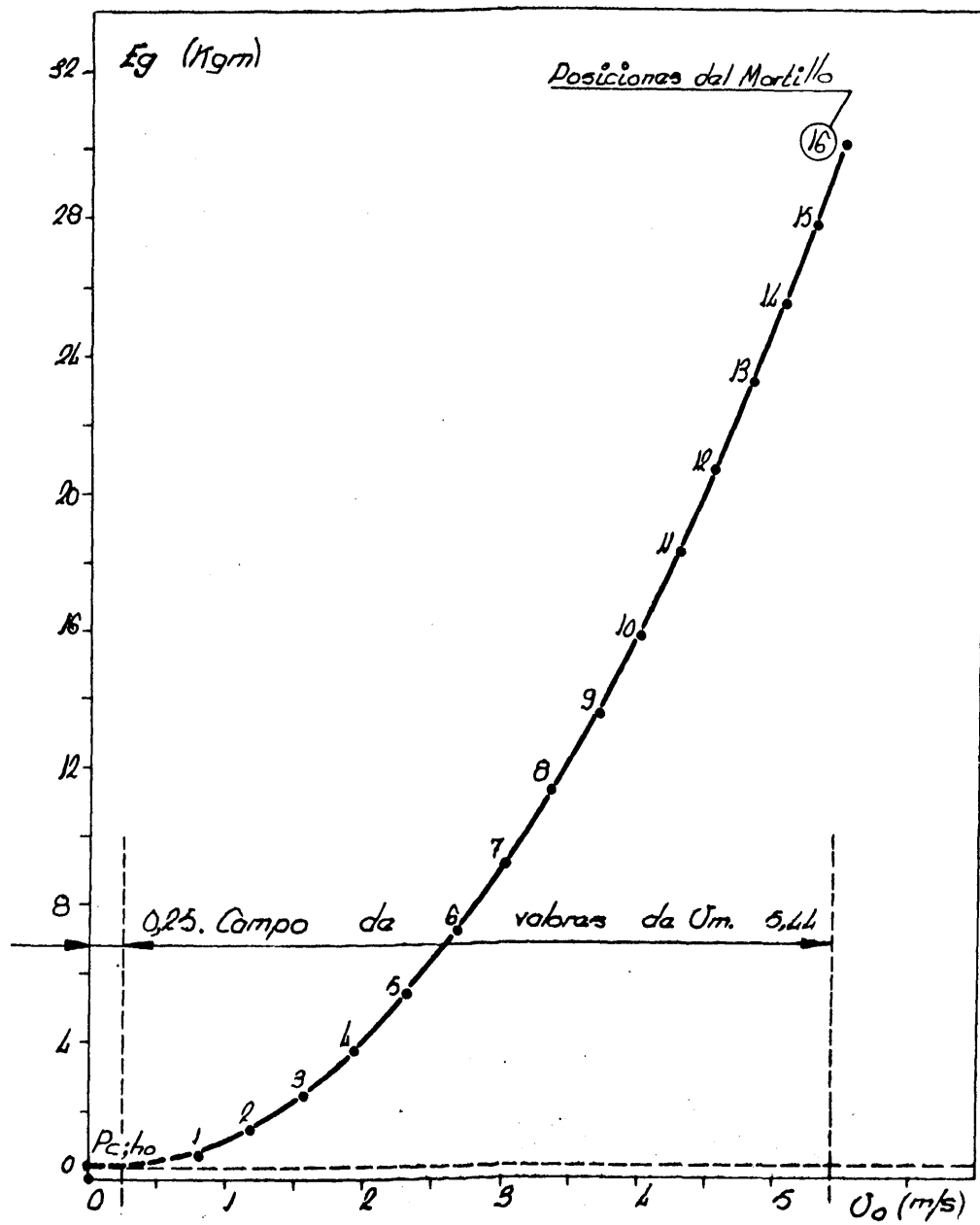
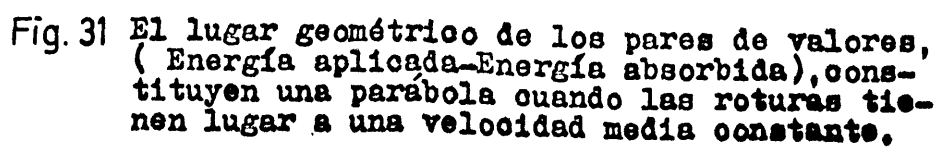
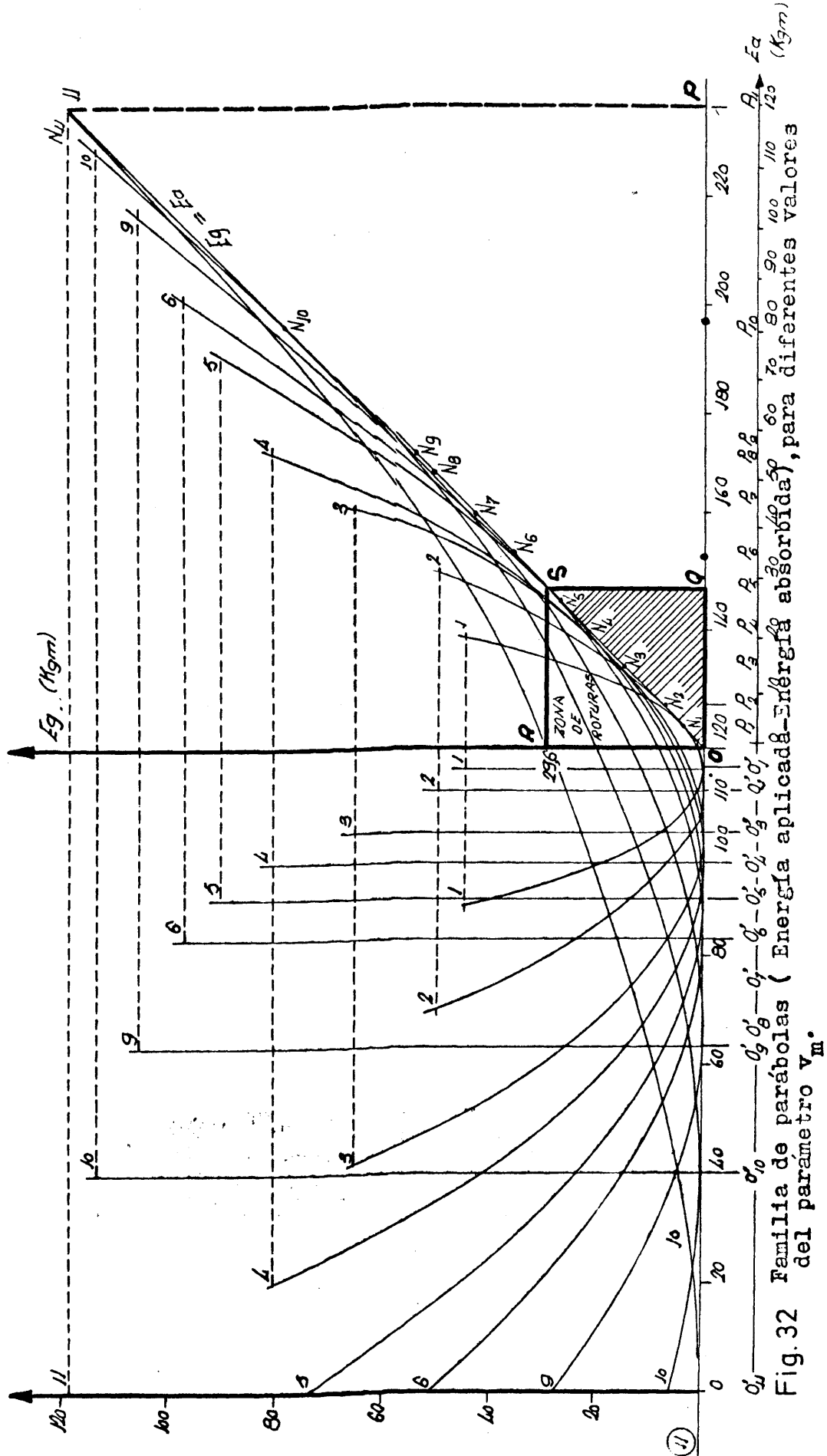


Fig. 30 Campo de valores del parámetro v_m según las cargas aplicables en un péndulo Charpy.





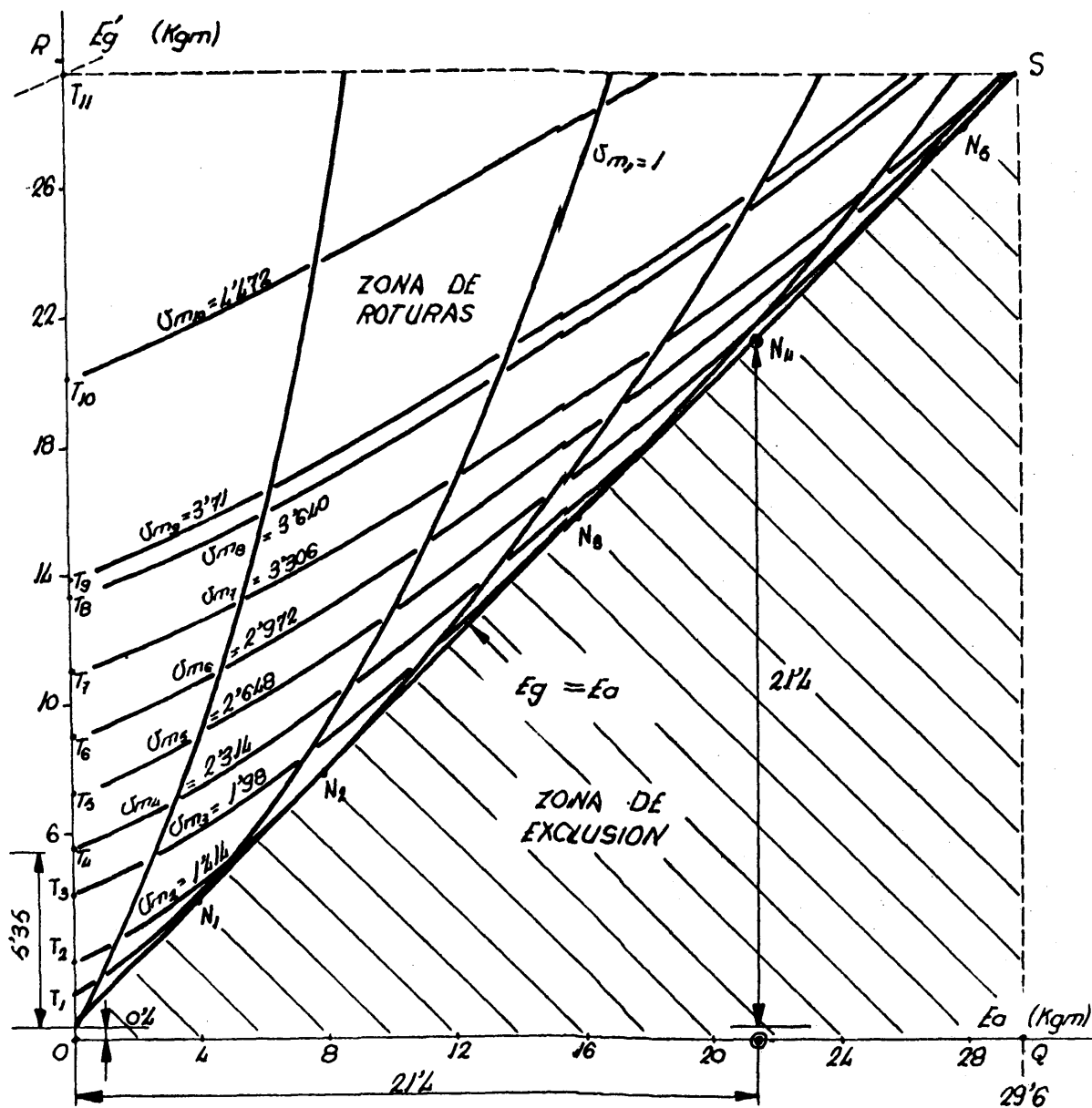


Fig. 33.- Familia de parábolas correspondientes a un péndulo Charpy de 30 Kgm. La recta (Energía aplicada = Energía absorbida), excluye a la zona rayada como lugar de puntos correspondientes a roturas reales.

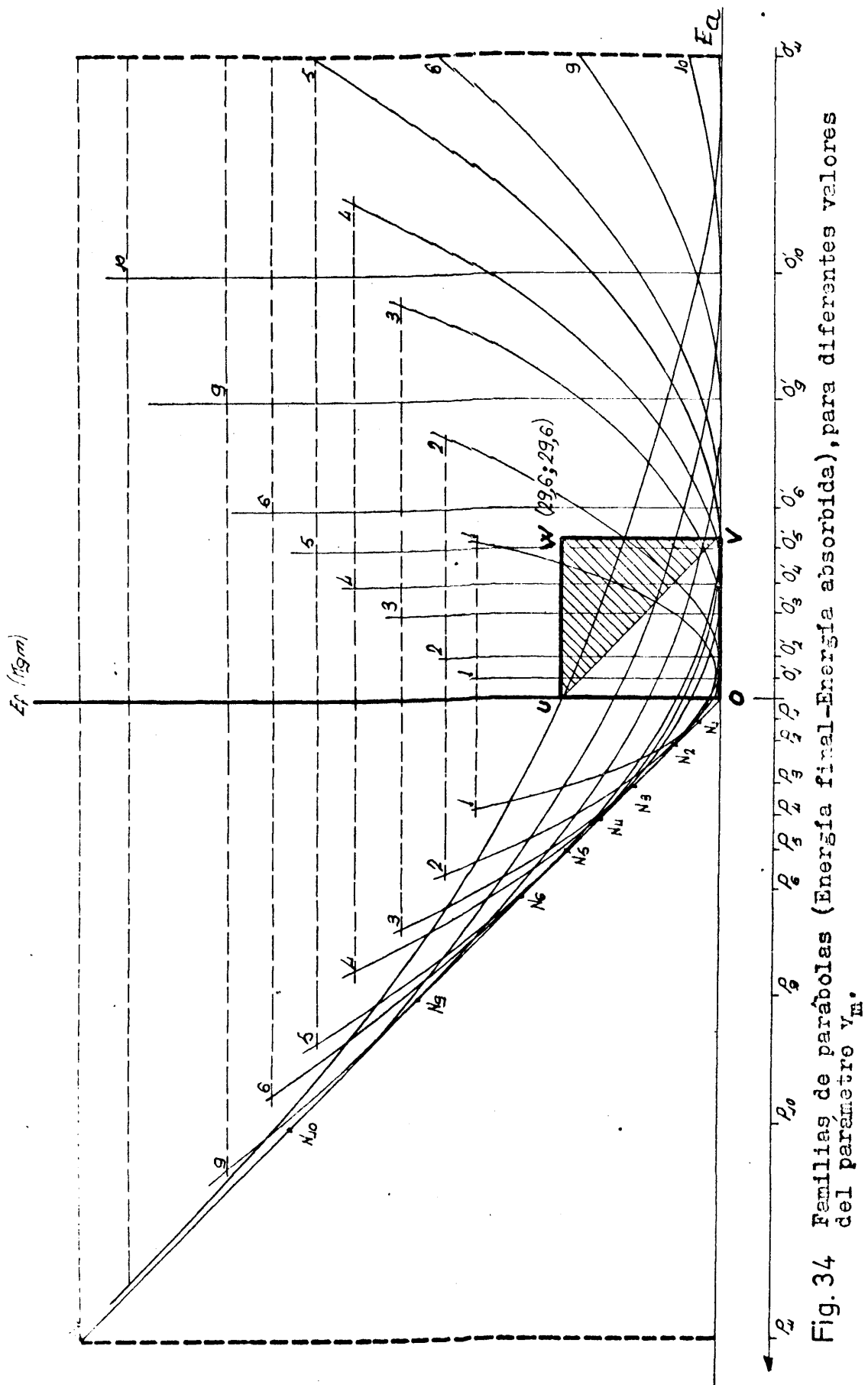


Fig. 34 Familias de parábolas (Energía final-Energía absorbida), para diferentes valores del parámetro v_m .

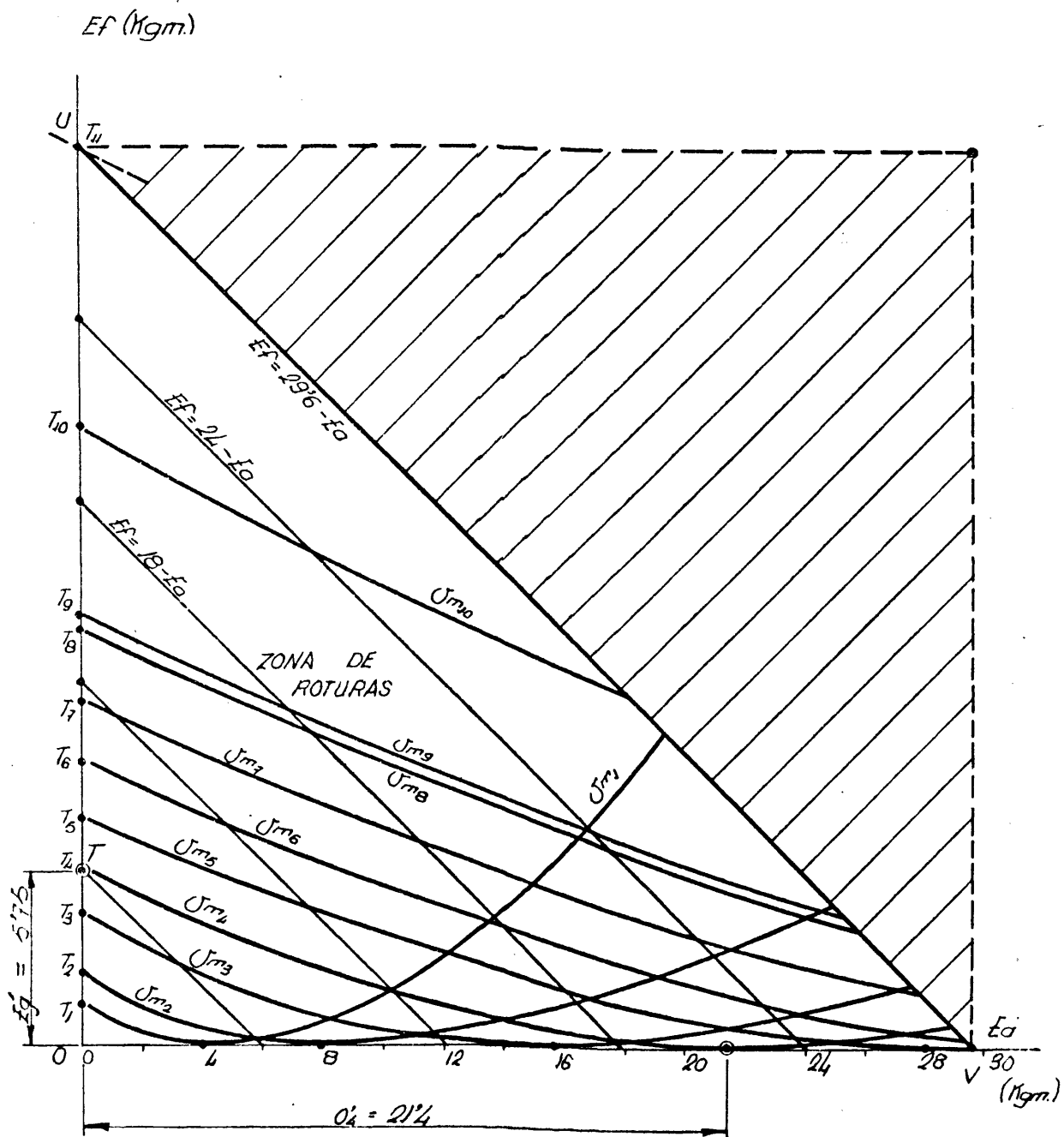


Fig. 35 Familias de parábolas (Energía-final-Energía absorbida), para un péndulo Charpy de 30 Kgm.

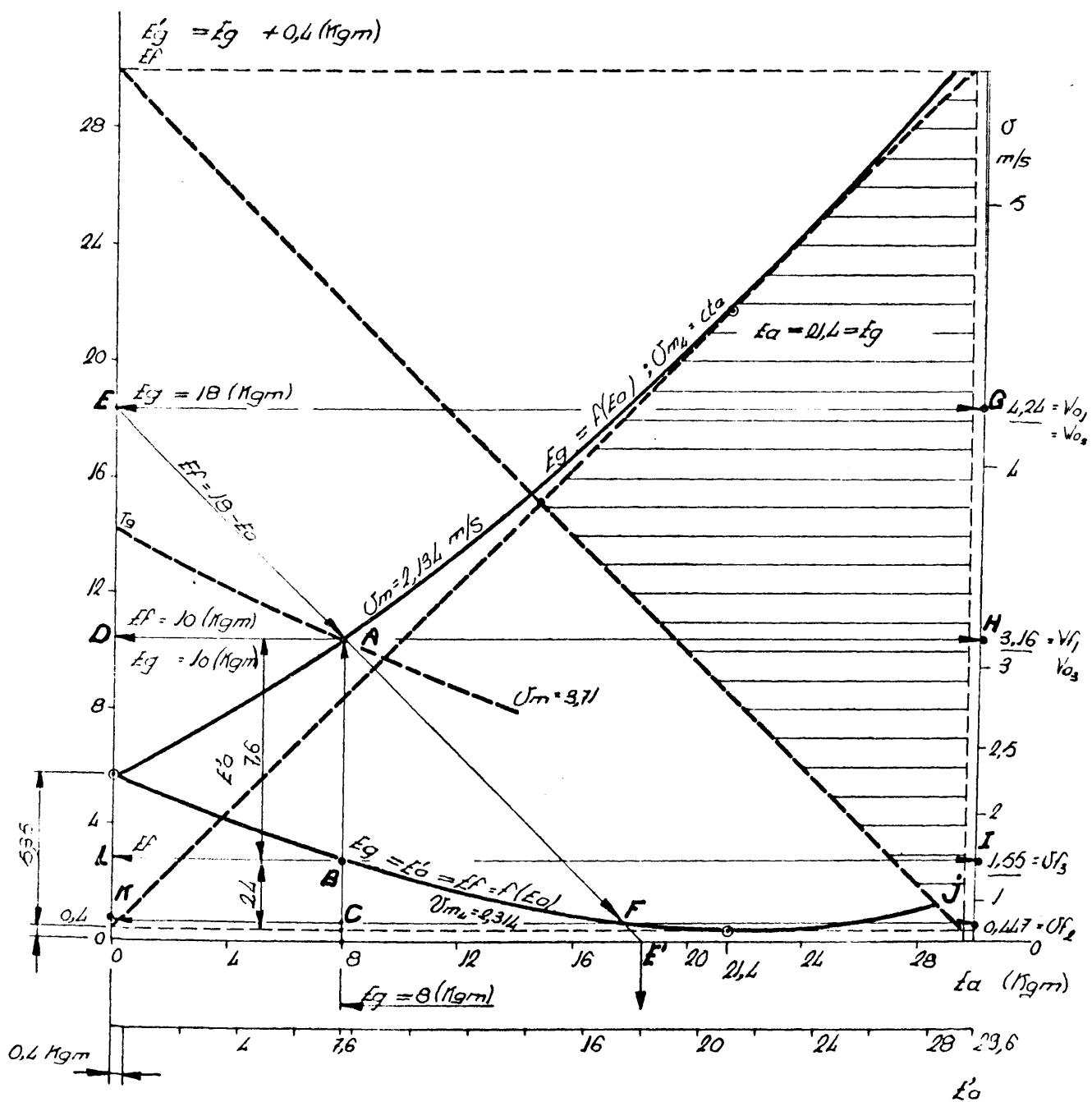


Fig. 36 Diagrama combinado de las Energías aplicada y final frente a la energía absorbida, para el valor de $v_m = 2,31 \text{ m/s}$.

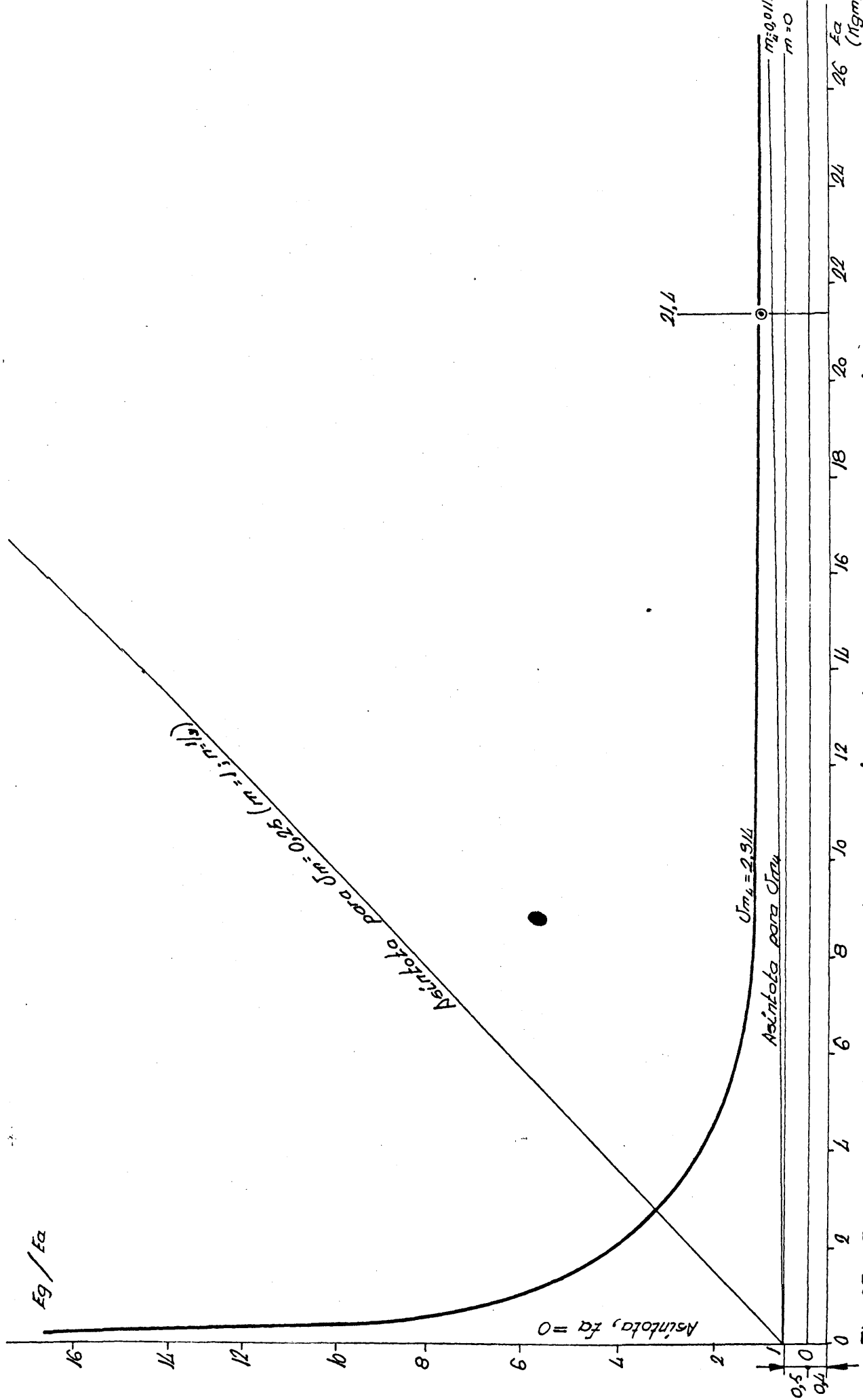


Fig. 37 Representación de la energía aplicada/energía absorbida frente a esta.

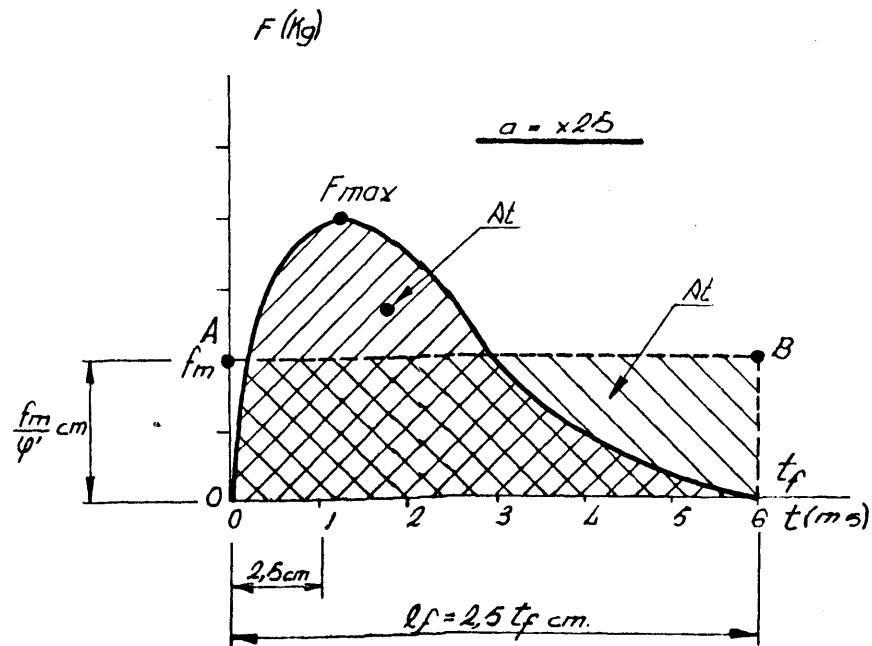


Fig. 38 Constantes y variables que intervienen, en la equivalencia entre el área bajo un pulso y su energía absorbida en el choque.

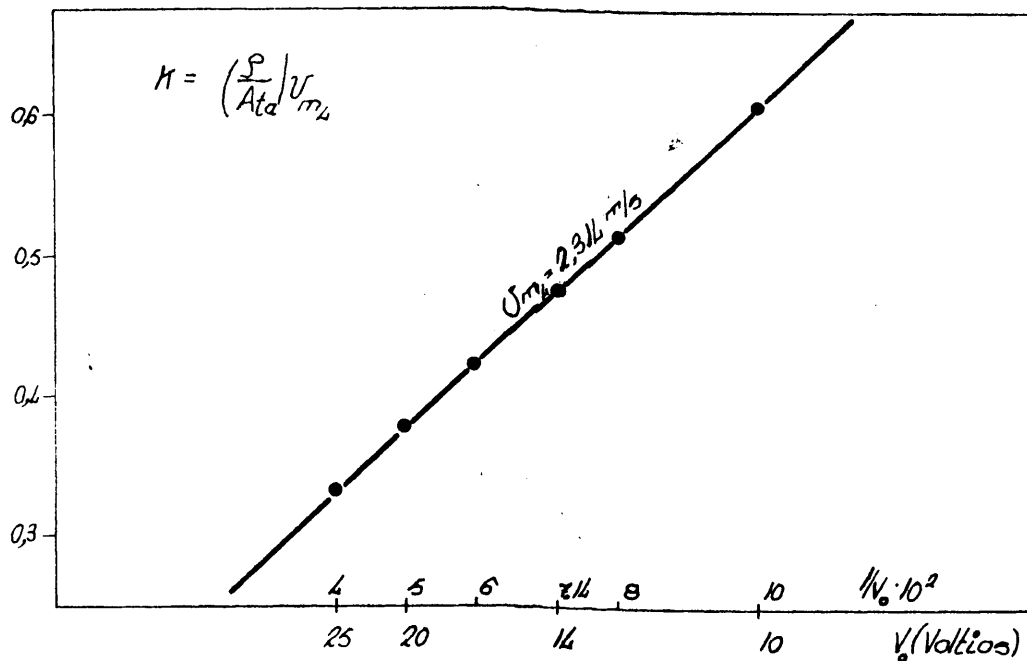


Fig. 39 Variación lineal del cociente Resiliencia/Área bajo los pulsos, en función de la tensión de alimentación al puente, para roturas practicadas a $v_m = 0 \text{ t/s}$.

V.- CONFIRMACIONES EXPERIMENTALES: DE LAS RELACIONES TEORICAS DEDUCIDAS.

5.1.- VARIACION DEL COCIENTE (ρ/A_t) CON LA ENERGIA APLICADA.

De la ecuación 32, y del valor de v_m en función de E_g y E_a , resulta:

$$\varphi = 415 \frac{\text{kg}}{\text{cm}}; \quad M = 2, \text{ U.T.M.}$$

$$k = 0,104 \left(\sqrt{E_g} + \sqrt{E_g - E_a} \right) \quad (35)$$

Resultando para la relación (resiliencia-área), la expresión:

$$\rho = k \cdot A_t$$

$$\rho = 0,104 \left(\sqrt{E_g} + \sqrt{E_g - E_a} \right) \cdot A_t \quad (36)$$

En la ec. 35, se ve que la pretendida constante k depende de la energía aplicada y de la absorbida, o sea, de las velocidades v_o y v_f .

Todas las roturas, sean cuales sean los valores de E_g y E_a , ($E_g > E_a$) dentro de la "zona de roturas" que tengan la misma velocidad media en el choque, darán lugar (sus puntos representativos en un diagrama $\rho - A_t$) a una recta que pasa por el origen.

Tal como se eligieron los aceros y sus tratamientos,

se pretendía obtener roturas con valores de $v_{m_i} = c^{te}$, y de k_i : 0,38; 0,48 y 0,75. Los aceros se prepararon para conseguir tres valores de v_m : 1,83, 2,31 y 3,61, para ello fue necesario romper un elevado número de probetas, de las cuales se seleccionaron los 12 valores medios citados.

Con la Fig. 40, se trata de confirmar que, a $v_{m_i} = c^{te}$, la relación resiliencia, o energía absorbida, frente al área bajo los pulsos es una línea recta.

Una representación más nutrida de valores experimentales se presenta en la Fig. 41. En lo sucesivo siempre que se represente un valor se ha de entender que es la media de tres roturas. En esta figura se observa ya la influencia de la energía aplicada sobre el área bajo los impulsos, que han roto con la misma absorción de energía.

En la Fig, 41, se representan las 3 rectas de la 40, pero lo que se pone de manifiesto es que la relación $\rho - A_t$ obedece a la ec. 36. Las curvas de trazos (C_1) son la representación de la ec. 36, mientras que las líneas continuas (C_2), corresponden a curvas que se han trazado según la tendencia de los puntos experimentales. Se observa una buen paralelismo entre las curvas de la ec. 36, para valores de energías aplicadas de $E_g = 3,4, 5,5; 11,8; 13,6; 17,8; 23,25$ y $29,6$ kgm. y la tendencia de los puntos obtenidos de roturas (ρ) midiendo el área bajo los pulsos fotografiados.

Otra tendencia que ya se puede apreciar en la Fig. 41 es que trazando rectas paralelas al eje (A_t) de las abs-

cisas, se tiene una serie de puntos que de dcha. a izqda. van atravesando las zonas de $E_g = C^{te}$, en sentido de las energías aplicadas crocipientes. Así, por ejemplo, los puntos A y B, que corresponden a dos probetas, representan que han absorbido una energía E_{a_3} 17,8 kgm. de carga y en B 29,6 kgm. Se ve que las probetas de A poseen un área media bajo los pulsos de unos 25 cm², mientras que en B sólo unos 17 cm². Esto indica claramente que para probetas que han absorbido igual energía, a medida que se les aplican cargas mayores, para romperlas, los pulsos que resultan poseen bajo sus curvas áreas decrecientes.

5.2.- INFLUENCIA DE LA CARGA APLICADA SOBRE EL AREA DE LOS PULSOS: CONFIRMACION EXPERIMENTAL.

Combinando las siguientes ecuaciones y eliminando Δv ,

$$A_{ta} = \frac{5000}{\varphi} \Delta v \quad \text{y} \quad M \Delta v \cdot v_m = E_a$$

resulta

$$A_{ta} = \frac{5000}{\varphi} \frac{E_a}{M v_m}$$

Sustituyendo v_m , y haciendo $\varphi = 415 \text{ kg/cm}$ y $M = 2$, U.T.M. .:

$$A_t = 12,4 \left(\sqrt{E_g} - \sqrt{E_g - E_a} \right) \quad (37)$$

Del conjunto de datos experimentales, se han seleccionado familias de probetas que habian absorbido en el ensayo energias similares con objeto de que en la ec. 37, E_a tomara valores casi iguales a una constante para cada familia y entonces la unión de estos puntos dará lugar a una curva que representa la variación del área bajo los pulsos en función de la energía aplicada. La curva (C) de la Fig. 42, se calcula según la ec. 37, haciendo ($E_g = E_a$), que nos limita una zona por encima de la cual no pueden existir puntos experimentales, en dicha figura.

Las curvas C'_1 de trazos resultan de representar la ec. 37, y las curvas C'_2 de línea llena se han trazado siguiendo la tendencia de los puntos representativos de las ro

turas experimentales.

En la Fig. 43, se reúne una mayor cantidad de datos experimentales que confirman lo comentado para la Fig. 42.

3.3.- INFLUENCIA DE LA CARGA APLICADA SOBRE EL TIEMPO DE ROTURA, EL LIMITE ELASTICO Y LA FUERZA MAXIMA, EN LOS PULSOS.

La disminución del área bajo los pulsos correspondientes a roturas, de igual energía absorbida con el aumento del proceso de carga aplicada, puede desdoblarse en los dos factores que intervienen en el área bajo los pulsos, que son: la fuerza media durante el choque y el tiempo total en que tiene lugar el mismo.

Las fuerzas medias se pueden calcular fácilmente a partir del área, bajo los pulsos o bien a partir de la energía absorbida y aplicada a la probeta según:

$$A_{ta} = h_m \cdot l_f \neq \varphi = 415 \text{ kgr/cm}; \quad a = 2,5$$

$$h_m = \frac{f_m}{\varphi} \quad l_f = t_f \cdot a$$

$$\frac{f_m}{\varphi} \cdot t_f \cdot a = A_{ta} \quad f_m = \frac{A_{ta} \varphi}{a \cdot t_f} \quad (38)$$

donde t_f se introduce en segundos, o también de,

$$f_m = \frac{E_{ab} \cdot 10^3}{t_f(\text{ms}) v_m} \quad (39)$$

De los valores de la tabla I, (véase Apéndice, XVIII), se observa que las variaciones del área bajo los pulsos, presentadas en la Fig. 43, tiene lugar en pulsos con la misma fuerza u ordenada media. La influencia que la carga aplicada (E_{ab}) ejerce sobre el área de los pulsos se debe a la influencia

su abscisa, o sea, en el tiempo de rotura, lo que se pone de manifiesto por la analogía de la Fig. 43 con la Fig. 44, en la que se representa el tiempo total de las roturas frente a las cargas aplicadas, para series de probetas que absorben en su rotura, más o menos la misma energía.

En las Figs. 45 y 46, se representan los límites elásticos dinámicos y las fuerzas máximas alcanzadas en el choque, en función de las energías aplicadas (E_{g_1}), a las probetas.

El ensayo Charpy instrumentado pone de manifiesto que los valores del límite elástico dinámico, medidos en el ensayo, son independientes de la carga aplicada. Lo mismo se observa para la máxima carga alcanzada en el choque. Entonces, los valores que resultan son atribuibles al acero, en las condiciones ensayadas.

5.4.- COMPROBACION EXPERIMENTAL DE LAS FUNCIONES: $E_g = f(E_a, v_m)$

$$E_f = f(E_a, v_m) \text{ y } E_g / E_a = f(E_a).$$

Inicialmente se verificaron 86 roturas con objeto de ir precisando los tratamientos térmicos que se debían dar, (previa determinación de las curvas de resiliencia-temp. de revenido y temp. de ensayo), para que los aceros empleados, F-144, F-123, F-152 y F-112, dieran un conjunto de valores de energía absorbida en la rotura tal, que cayeran en una rama de parábola de $v_m = 2,314$, es decir, cuya velocidad media en el choque sea constante. De esta serie preliminar, se adoptaron los tratamientos adecuados, para las energías de rotura deseadas. Aprovechando ya, esta serie preliminar menos precisa, en la Fig. 47, se pone de manifiesto la coincidencia con la función deducida para $(E_g / E_a) = f(E_a)$. En las Figs. 48 y 49, se representan datos más exactos, correspondientes a una segunda repetición de roturas, corrigiendo los tratamientos térmicos dados a los mismos aceros, con objeto de lograr una mayor precisión en la reproducción de las funciones deducidas, ecs. 20 y 25.

En la Fig. 48, se representan los valores de E_g y E_a correspondientes a nueve partidas de probetas que fueron sucesivamente tratadas y rotas, de forma que en cada partida todas las probetas presentaran la misma absorción de energía en el choque, con deformación y rotura. Conociendo de antemano este valor de E_a , (dentro de la precisión con que puede operarse), se aplicaron cargas, E_g , tales que el conjunto (E_a, E_g) , correspondiente a las roturas, dieran lugar a puntos

que cayeran en la rama de parábola, v_{m4} de 2,314 m/s.

Los puntos (a, b, c, h), en la Fig. 48, corresponden a valores (E_a , E_g) de probetas que no han roto por ser la recta ($E_g / E_a = 1$) la que excluye la posibilidad de la rotura. Las líneas verticales trazadas según la tendencia de los puntos experimentales presentan una curvatura inferior hacia la izquierda, la que se acentúa a medida que la energía aplicada se aproxima más a la que va a absorber la probeta. Esta tendencia parece estar de acuerdo con la de las curvas F_e y F_{max} , como función de la energía aplicada, Fig. 46, aunque allí no se han dibujado las rectas en su extremo izquierdo con curvatura hacia abajo, que parece la tendencia natural de los puntos. Entonces, se observa que cuando se ensayan probetas con cargas próximas a las que se van a absorber, el ensayo Charpy da valores de resiliencia **erróneos** por defecto y es necesario aplicar un exceso de energía mínimo, para que por encima de él, las energías aplicadas garanticen un valor constante de la energía absorbida, independiente de la energía aplicada. En la Fig. 48, se traza la recta

$$E_g = \frac{M}{2} v_{m4}^2 + E_a \text{ (recta RR')} \quad (40)$$

por encima de la cual, la tendencia de los puntos experimentales es la de una recta vertical, en la que la energía absorbida por una probeta es más o menos constante (no dependiente de la energía aplicada) y por lo tanto, atribuible a la probeta, dentro de las condiciones de ensayo.

A medida que la energía que va a absorber una probeta es mayor, la curvatura se va desplazando a niveles de energía aplicada más altos, y parece aconsejable que probetas que absorban más de 24 kgm. no presentaran una completa independencia de la energía aplicada a la probeta, en un péndulo de 30 kgm. disponibles. El comienzo de esta curvatura se desplaza a niveles de energía aplicada crecientes a medida que crece el nivel de absorción de energía.

Efectivamente, la ec. 20, que da las ramas de parábola, se representa en la rama (4), para el valor de $v_{m4} = 2,314$ m/s, Fig. 48, y todos los pares de valores (E_a, E_g) que dan puntos que caen en ella, tienen un valor experimental de v_m , muy próximo a v_{m4} . La recta RR' tiene como ordenada en el origen el valor de $(M/2)(v_{m4})^2$ y según los puntos experimentales obtenidos (al menos según se ve para $v_m = 2,314$) las energías mínimas a aplicar se pueden tomar de la ec. 40, es decir,

$$E_g = 5,35 + E_a \quad (\text{para } v_m = 2,314 \text{ m/s}).$$

En la Fig, 49, se representa la diferencia $(E_g - E_a)$ como función de E_a , o sea, el exceso de energía aplicada sobre la que se absorbe. Esta diferencia es la energía final que le queda al martillo después de consumarse la rotura. En esta figura se observa mejor la independencia de la energía aplicada, por encima de la horizontal ($E_f = 5,35$ kg., para $v_m = 2,314$ m/s) respecto a la energía absorbida.

En la Fig. 50, se han representado los máximos valores de la fuerza ejercida por el martillo sobre la probeta, como función de la energía aplicada o de la velocidad inicial del choque. La curva (L) es trazada según el comienzo de caída de la fuerza máxima corresponde aproximadamente con la condición de $E_g = 5,35 + E_a = \sqrt{\frac{2}{M}} \cdot \sqrt{v_o}$. Para el acero (5), y 7,3 ms. para energías aplicadas de 10,8, 11,3 y 11,8 kgm., respectivamente, absorbiendo las probetas un valor medio de 10,4 kgm. o de 13 kgm/cm² de resiliencia. La proximidad de la carga aplicada a la absorbida, hace que la rotura dure más del doble de lo que dura, con la misma energía absorbida, pero para una energía aplicada de 29,6 kgm. para la que el tiempo de rotura es de 3,5 ms. parece, (especialmente en probetas entalladas en U) en las que está más favorecida la deformación plástica en las proximidades de la entalla, que en probetas con entalla en (V) que estas diferencias de más del 100% en el tiempo de deformación y rotura, o sea de la velocidad de deformación, hacen que a valores de E_g próximos a los de E_a . Las fuerzas máximas alcanzadas resultan menores con la disminución de la velocidad de deformación, hasta un valor mínimo por debajo del cual ya no se produce la rotura. Por otra parte la curva (L) trazada según la caída de las F_{max} (parte izqda. de las curvas de la Fig. 50,) coinciden bien con la condición de que aplicando un exceso de carga, sobre la que la probeta va a absorber, de 5 a 6 kgm. la velocidad de deformación - dadas las condiciones del ensayo- deja de afectar al valor de la F_{max} , resultando rectas horizontales no afectadas por la velocidad inicial del choque, con lo que entonces se puede conseguir para cada acero, la medida de la fuerza máxima alcanzada en el choque, independientemente de la carga aplica-

da, y, por lo tanto, esta característica del choque se puede atribuir a cada acero en su estado metalúrgico, independientemente de la carga aplicada y dentro siempre de las mismas condiciones geométricas del ensayo Charpy. Las flechas acompañadas de los números (1) a (9) indican el comienzo de la disminución de la fuerza máxima en el caso de que realmente ésta se produjera, cuando el exceso de energía aplicada comenzara a ser inferior a 5,35 kgm.

En cuanto a los límites elásticos dinámicos se observa en la Fig. 51 que en los aceros (4), (5), (6), (7) y (8), no parecen estar influenciados por la velocidad de choque inicial. Los puntos se detienen en el extremo izquierdo de las curvas a valores de energía aplicada, ya muy próximos a los que se absorben en la rotura. El hecho de que los aceros (2) y (3), que absorben bajas energías y el acero (9), (F-152), reconido que presentan disminuciones de la fuerza límite que se está considerando, en función del tiempo, en los aceros (2) y (3), a energías aplicadas cada vez más próximas a las que absorben, se deje sentir de nuevo el efecto de la velocidad de deformación, sugieren que aunque rompen en las proximidades de la fuerza límite, el mecanismo de formación de la grieta sea debido a deformaciones plásticas localizadas, y alcanza la fuerza del límite elástico independiente de la velocidad de deformación, alcanzándose una carga límite común para cada acero.

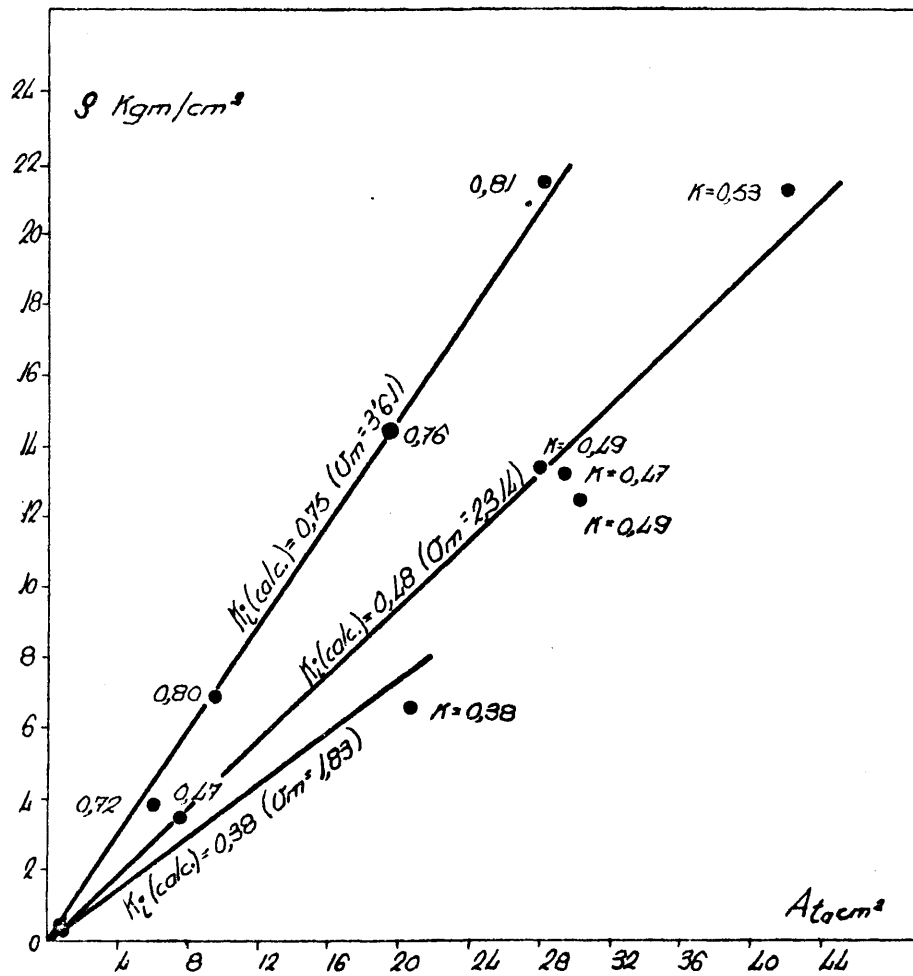


Fig.40 La relación Resiliencia / Area bajo los pulsos es lineal para roturas practicadas a $v_m = 0^{to}$.

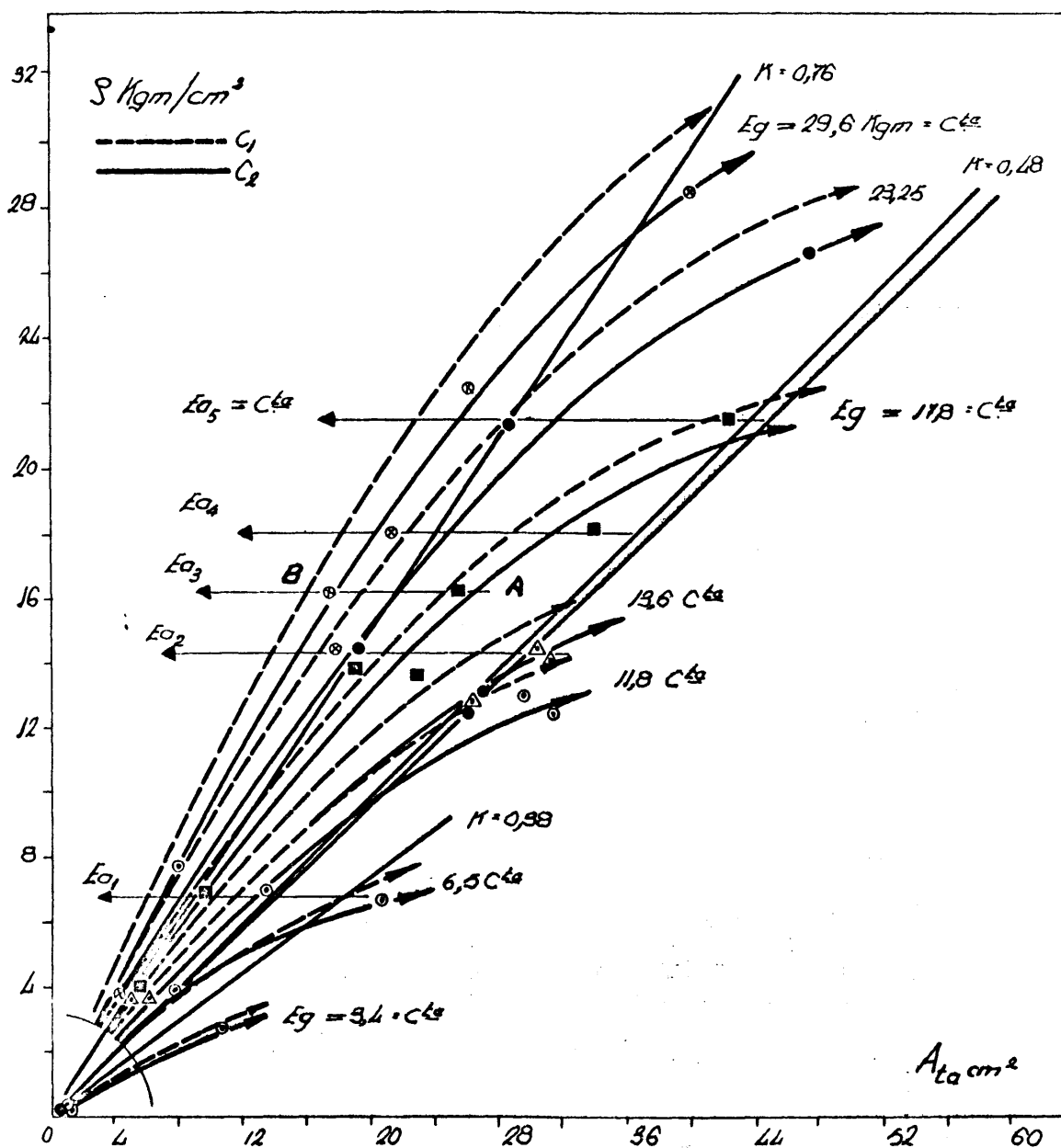


Fig. 41 La función Resiliencia / Area bajo los pulsos, (ec. 36) depende de las energías aplicada y absorbida. Las líneas de trazos corresponden a dicha ecuación y las continuas a la tendencia de los puntos experimentales.

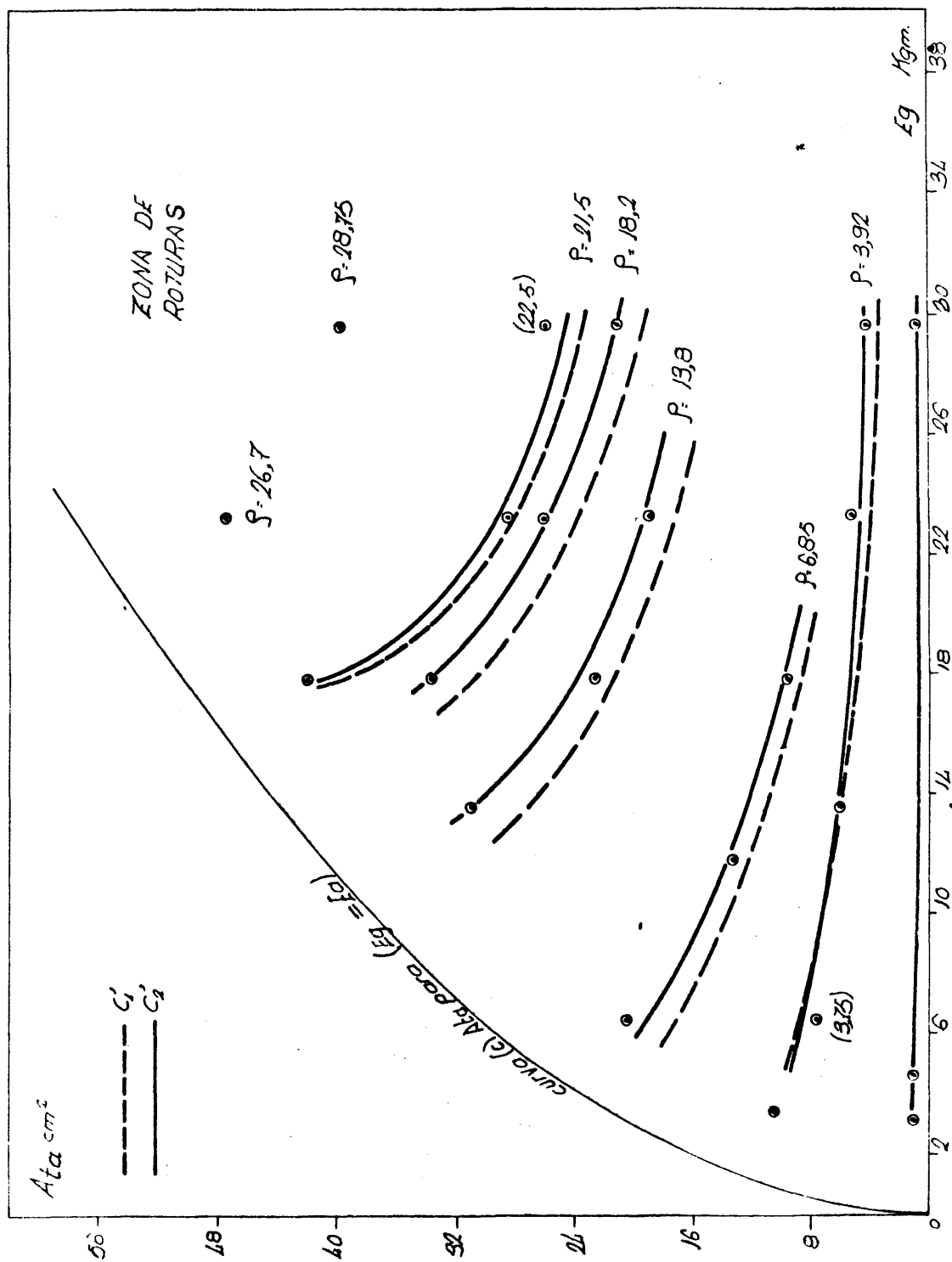


Fig. 42 Curvas teóricas (C'_1), y experimentales (C'_2) en las que se aprecia la disminución del área bajo los pulsos a medida que aumenta la carga aplicada, en probetas que han absorbido la misma energía en la rotura.

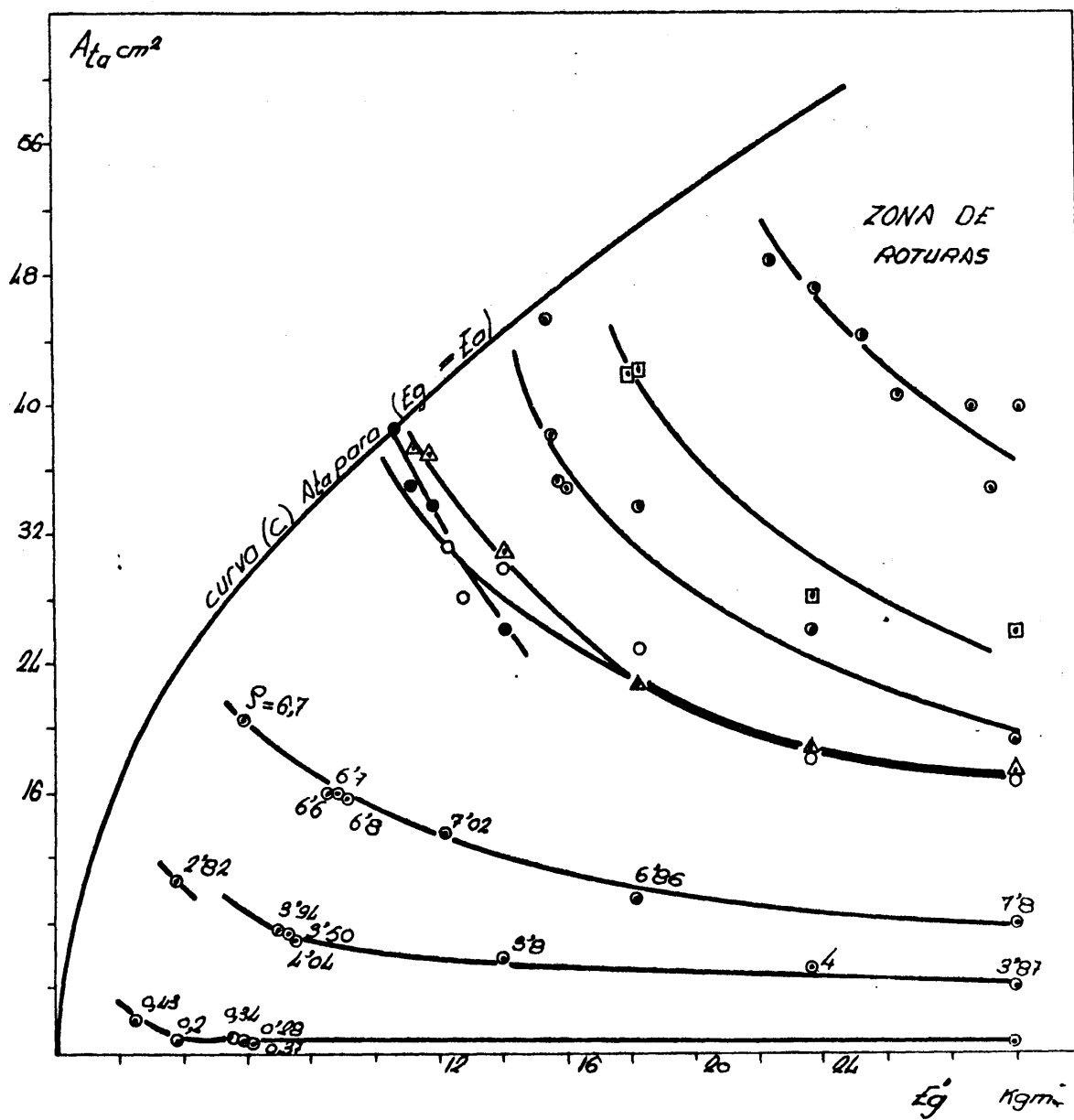


Fig. 43 Valores experimentales del área bajo los pulsos en función de las energías aplicadas. Se presentan líneas de iso-resiliencia.

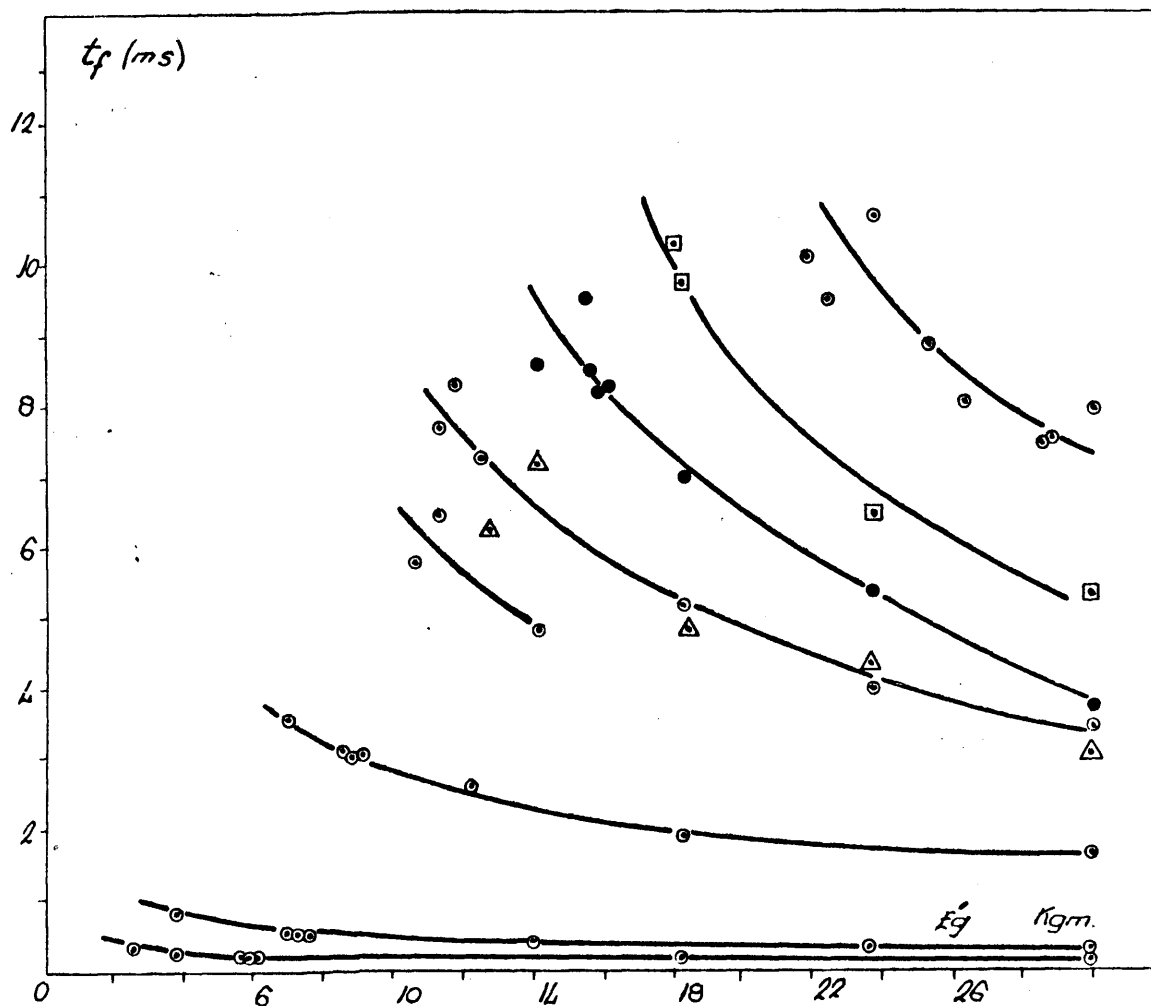


Fig. 44 Tendencia de las líneas de isoresiliencia apreciándose la disminución del tiempo de rotura con el aumento de la energía aplicada.

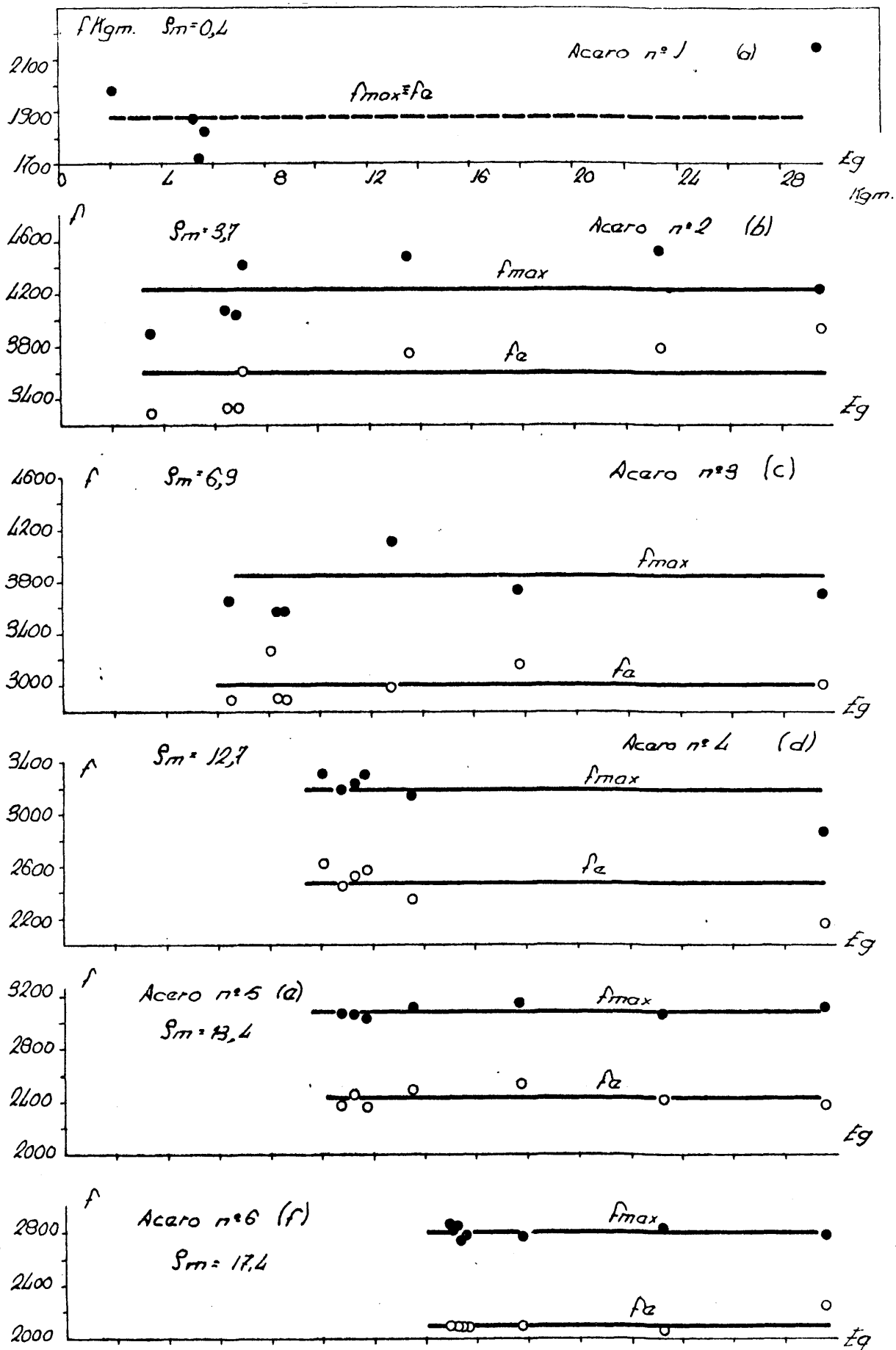


Fig. 45 Los valores de los límites generales y cargas máximas son independientes de la energía aplicada, siempre que ésta exceda a la energía absorbida en unos 6 Kg·m.

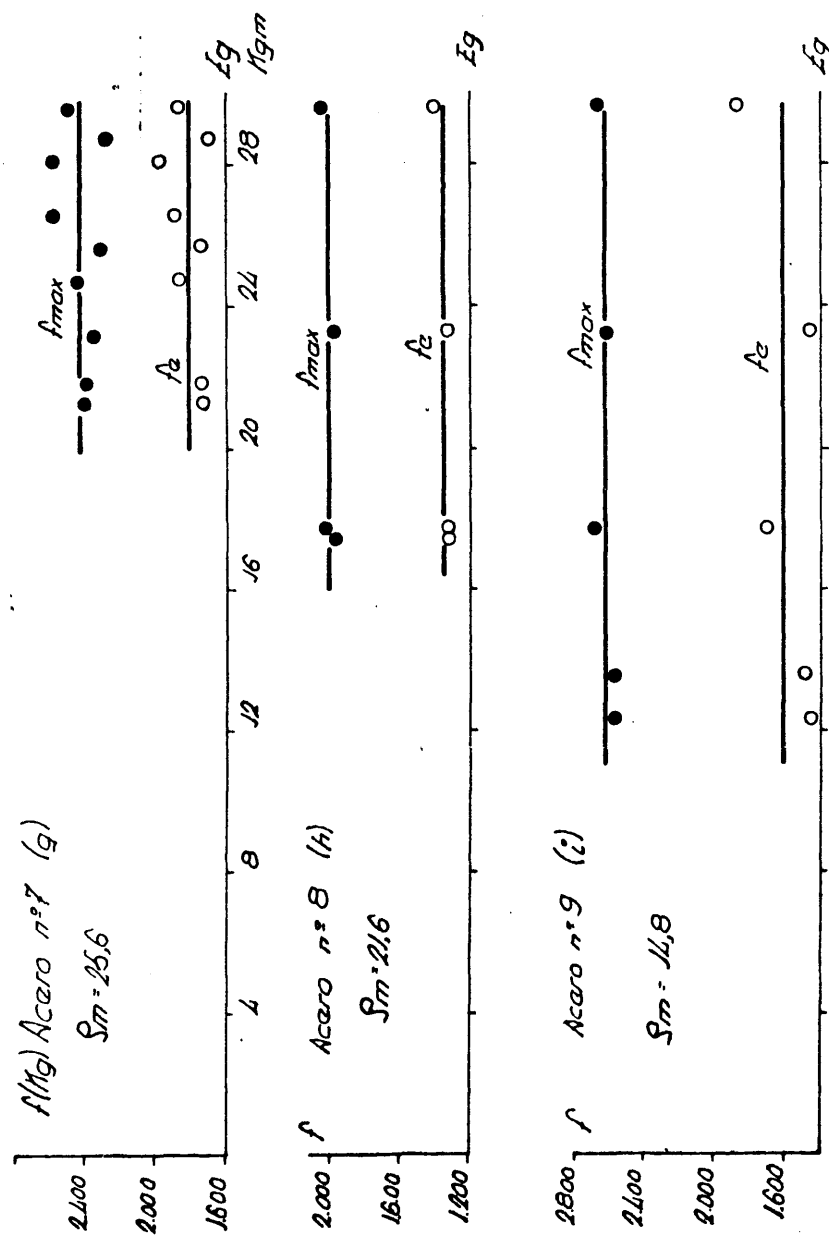


Fig. 46 Los valores de los límites generales y cargas máximas son independientes de la energía aplicada, siempre que ésta exceda a la energía absorbida en unos 6 Kgm..

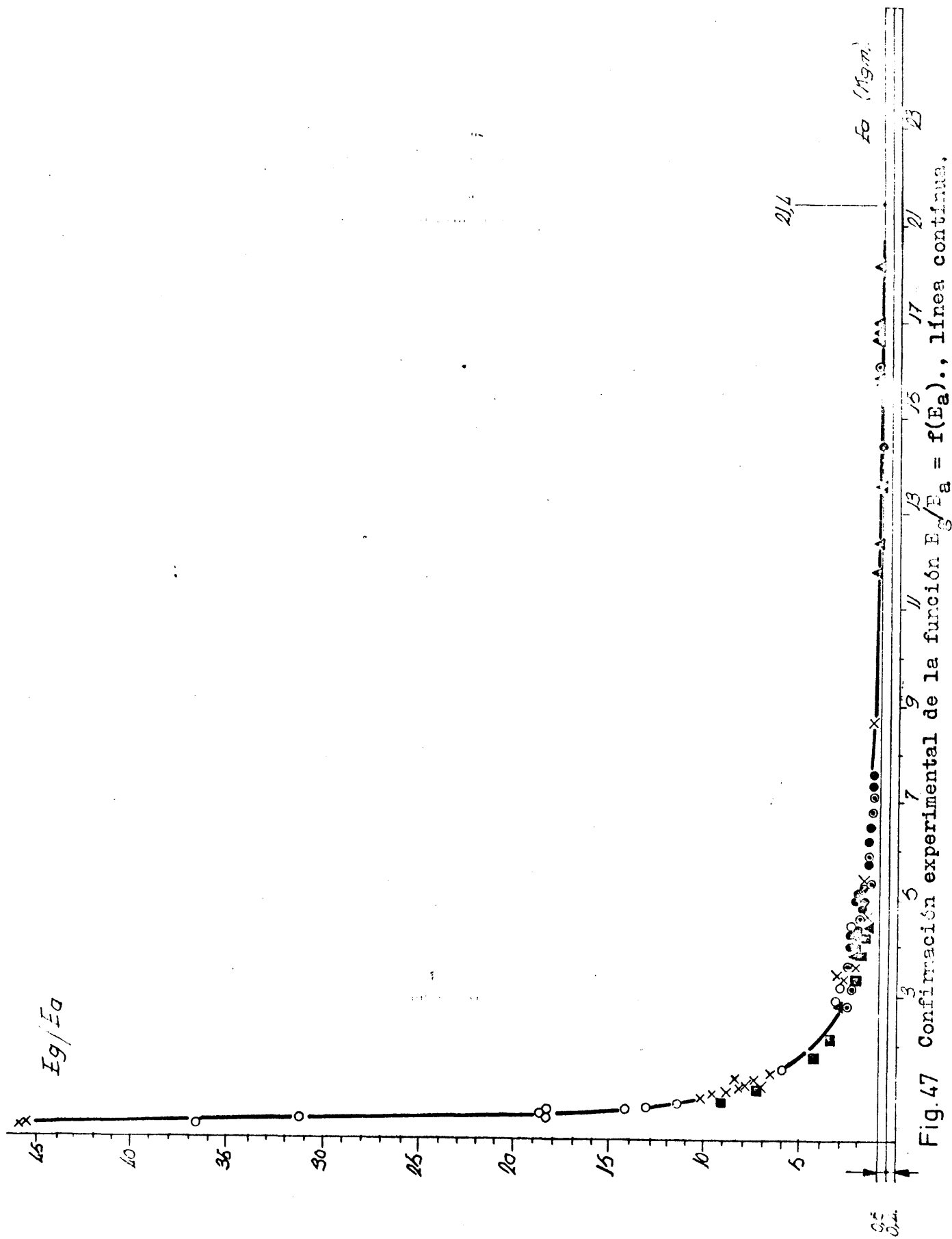


Fig. 47 Confirmación experimental de la función $E_g/E_a = f(E_a)$., línea continua.

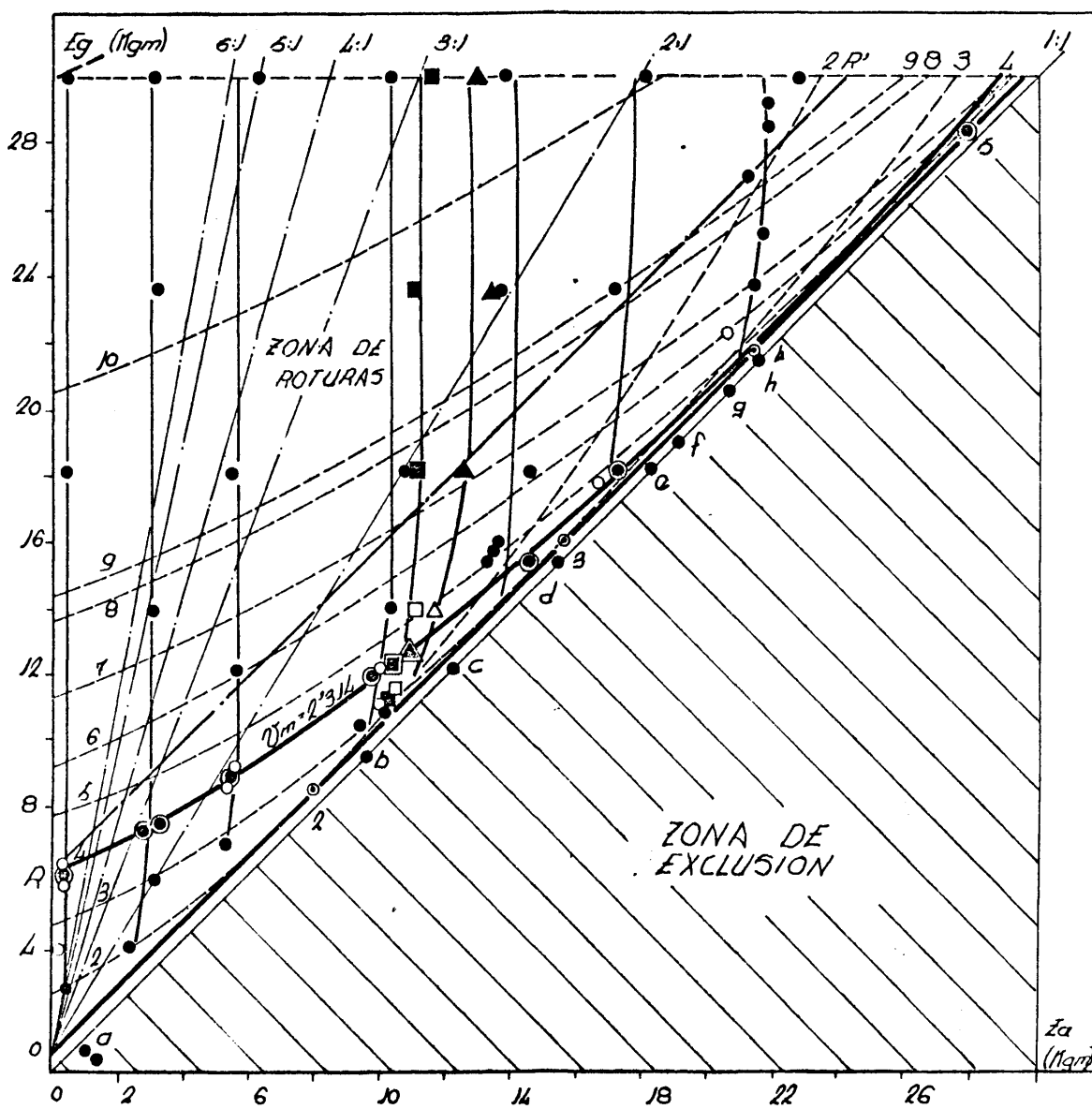


Fig.48 Confirmación experimental de la relación: $E_g = f(E_a, v_m)$,
(eo. 20).

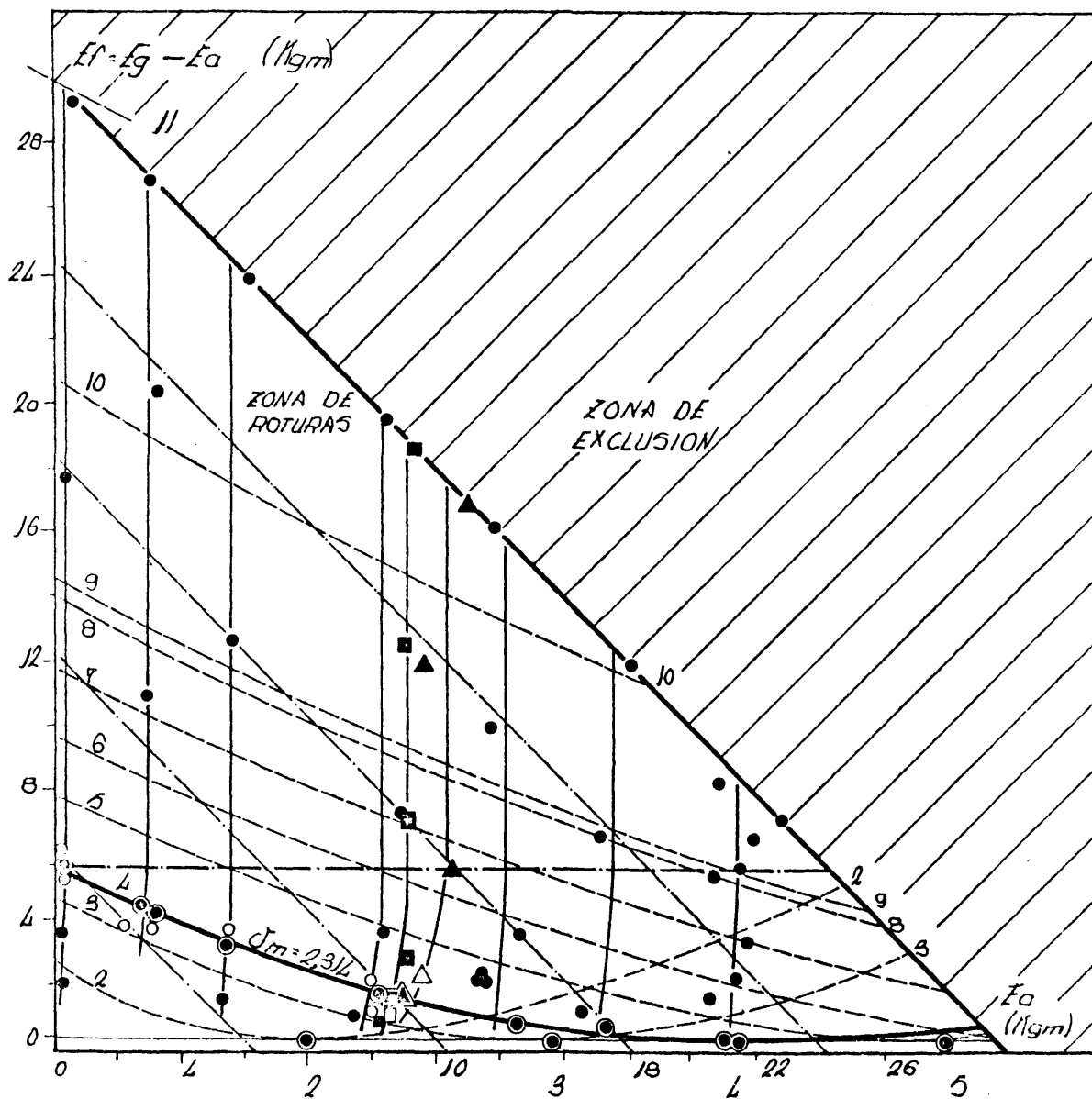


Fig.49 Comprobación experimental de la función $E_f = f(E_a, v_m)$, para el valor particular de $v_m = 2,31$ m/s..

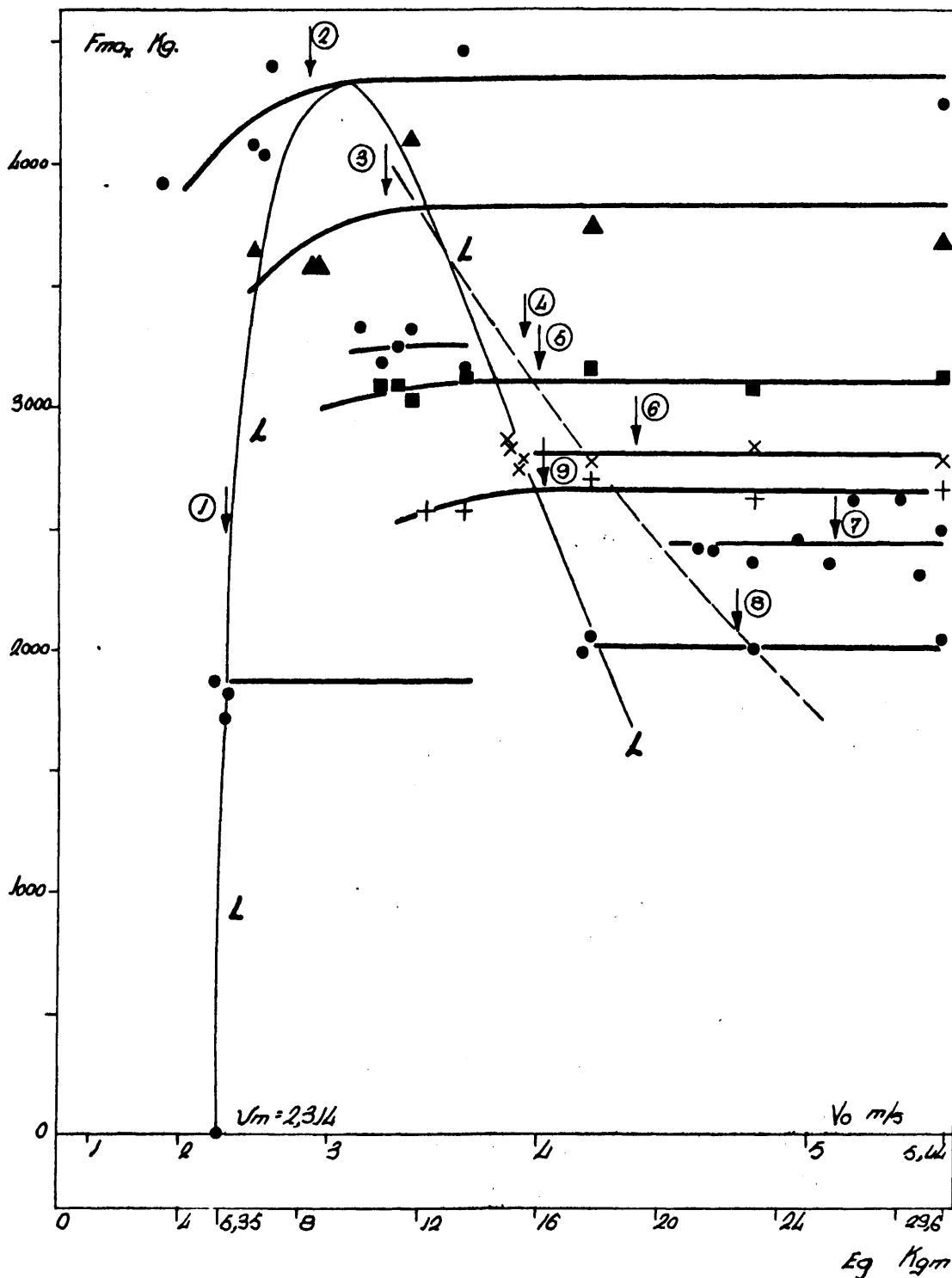


Fig.50 La fuerza máxima alcanzada en una rotura disminuye a medida que la energía aplicada se aproxima a menos de 6 Kg. de la energía que absorbe la probeta en la rotura.

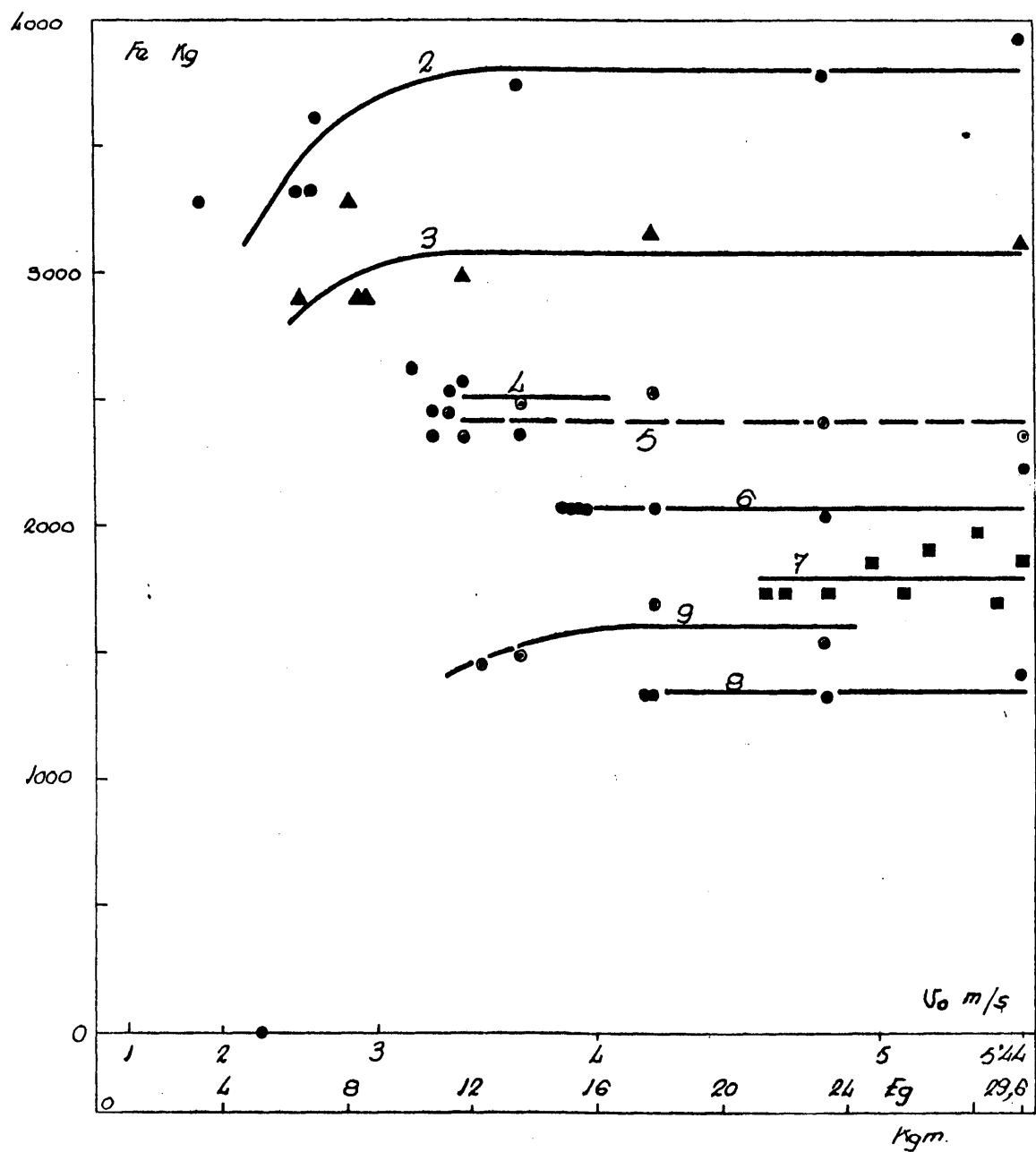


Fig. 51 La fuerza correspondiente al límite general disminuye a medida que la energía aplicada se aproxima a menos de 6 Kgm. de la energía que absorbe la probeta.

VI.- ANALISIS DE LOS PULSOS.

6.1.- RELACIONES FUERZA, TIEMPO Y AREA BAJO LOS PULSOS.

En los pulsos registrados oscilográficamente se mide la fuerza del límite elástico, f_e , la fuerza máxima, f_{max} , la fuerza a la que se presenta la brusca propagación de la rotura f_r , el tiempo en el que se alcanza f_e , f_{max} y en el que finaliza la rotura t_e , t_{max} , t_r y t_f , respectivamente, o estos intervalos de tiempo asociados a la etapa elástica, plástica y de rotura.

$$\Delta t_e = t_e - 0$$

$$\Delta t_p = t_{max} - t_e$$

$$\Delta t_f = t_f - t_{max}$$

Se pueden determinar, las áreas parciales hasta t_e , t_{max} , t_r y la total, o sea, medir las áreas A_e , A_p , A_r y A_t , correspondientes a las abscisas desde cero a t_e , t_p , t_r y t_f .

El área total que nos da el pulso, permite el cálculo de la fuerza media según

$$M \Delta v = \int_0^{t_f} F(t) dt = f_m \cdot t_f = A_o \quad (41)$$

A_o es el área bajo el pulso sin ampliar, tal como se fotografía, siendo

$$f_m = A_0 / t_f$$

La primera integración gráfica de este pulso nos proporciona una curva $v = v(t)$, que nos permite conocer la velocidad instantánea del martillo.

La segunda integración gráfica consecutiva nos da la curva $\delta = \delta(t)$, siendo $\delta(t)$, el espacio recorrido por el martillo mientras está en contacto con la probeta, ejerciendo fuerza sobre ella, y como una función del tiempo.

6.2.- RELACIONES ENTRE ENERGÍAS, VELOCIDADES Y FLECHAS: COM- PROBACIONES EXPERIMENTALES DEL DESDOBLAMIENTO DE LOS PULSOS.

En la primera curva integral y en la segunda se pue-
den medir

$$v_e ; \Delta v_e ; v_m(t) = Av/t_f ; A_{ve}$$

$$v_{max} ; \Delta v_p ; v_m = \frac{v_o + v_f}{2} ; A_{vp}$$

$$v_f ; \Delta v_r ; Av_t ; A_{vr}$$

siendo:

$$v_o = \sqrt{\frac{2 E_g}{M}}$$

$$y \quad \delta_e ; \Delta \delta_e ; \delta_m(t) = A\delta_t/t_f ; A_{\delta_e}$$

$$\delta_{max} ; \Delta \delta_p ; \delta_m = \delta_f/2 ; A_{\delta_p}$$

$$\delta_f ; \Delta \delta_r ; A_{\delta_t} ; A_{\delta_r}$$

Un pulso y sus dos primeras integrales pueden pro-
porcionar unos 30 datos de interés a parte de conocerse las
curvas que dan los parámetros del choque en función del tiempo,
lo que permite conocer valores instantáneos de: deceleraciones,
fuerzas, velocidades, flechas recorridas, energías, velocida-
des de absorción de energía, etc.

Se vió que para todos los puntos que pertenecen al plano de energías, aplicada y absorbida , y ubicados en una rama de parábola de $v_{m_i} = C^{te}$ determinada, se cumplía

$$E_{ab_i} = M v_{m_i} \Delta v_i$$

Para la rama de parábola con la que se trabajó especialmente, de $v_m = 2,314 \text{ m/s}$, $k = 0,48$,

$$E_{a_4} = 2,2,314. \Delta v = 4,627 \Delta v \quad (42)$$

$$\rho = 0,48 A_t \quad (43)$$

Siendo A_{t_2} el área media bajo la curva $F(t)$, después de ampliarse x 2,5; dividiendo la (42) por la (43),

$$\frac{E_a}{\rho} = 9,64 \frac{\Delta v}{A_t} = 0,8$$

de donde

$$A_{t_2} = 12,5. \Delta V \quad (44)$$

Para el área bajo el pulso sin ampliación tal como se registra en el oscilógrafo

$$\frac{A_t}{2,5^2} = A_o = \frac{12,5}{6,25} \Delta V$$

$$A_o = 2 \Delta V = M \Delta V \quad (45)$$

La Fig. 52 representa la recta $A_t = 12,5 \cdot \Delta V$, a base de valores experimentales de A_t e ΔV . Cada punto es el promedio de tres roturas.

De la expresión:

$$\begin{aligned} E_{ab} &= M v_m \Delta V = f_m \cdot v_m \cdot t_f = \\ &= v_m \int_0^{t_f} F(t) dt = v_m \frac{A_t}{6,25} \\ E_{a4} &= 0,37 A_t \end{aligned} \quad (46)$$

o de

$$\begin{aligned} E_a &= 0,8 \\ \rho &= 0,48 A_t \end{aligned} \quad E_a = 0,8 \cdot 0,48 A_t = 0,38 A_t$$

El valor de $k_4 = 0,48$ resulta ligeramente alto, respecto a $v_{m4} = 2,314$, pero se usa como dato experimental correspondiente a v_{m4} , dado que es muy difícil, preparar un conjunto de probetas que rompan con una energía absorbida A tal a la deseada.

También se tiene la relación:

$$\rho = \frac{v_m}{0,8 \cdot 6,25} A_0 ; \quad \rho = \frac{v_m}{5} A_0 \quad (47)$$

y

$$k_4 = \frac{v_m}{5} = \frac{2,314}{5} = 0,463 \approx 0,48$$

En la Fig. 53, se presentan pares de valores ($E_a, \Delta v$) correspondientes a roturas, observándose que se cumple bien la recta

$$E_a = M. v_m. \Delta v$$

para valores de v_m constantes.

6.3.- RELACIONES ENTRE OTRAS MAGNITUDES Y DATOS PARCIALES.

En la Fig. 54, se representan la mayoría de las magnitudes y datos parciales a considerar.

En todas las curvas el pulso original y sus dos curvas integrales sucesivas se cumplirá:

$$\Delta t = t_f - 0 = \Delta t_e + \Delta t_p + \Delta t_r$$

Análogamente para las ordenadas de la curva $F = F'(t)$

$$0 = \Delta f_e + \Delta f_p + \Delta f_r$$

$$\Delta f_e = f_e - 0$$

$$\Delta f_p = f_{\max} - f_e$$

$$\Delta f_r = 0 - f_{\max}$$

y para las áreas,

$$6,25 A_o = A_{ta} = A_e + A_p + A_r$$

En la primera curva integral $v = v(t)$ se tendrá

$$\Delta v = v_f - v_o = (\Delta v_e + \Delta v_p + \Delta v_r)$$

donde:

$$\Delta v_e = v_e - v_o$$

$$\Delta v_p = v_{\max} - v_e$$

$$\Delta v_r = v_f - v_{\max}$$

De la segunda curva integral $\delta = \delta(t)$ se tiene:

$$\delta_f = \Delta\delta_e + \Delta\delta_p + \Delta\delta_r$$

$$\Delta\delta_e = \delta_e - 0$$

$$\Delta\delta_p = \delta_{\max} - \delta_e$$

$$\Delta\delta_r = \delta_f - \delta_{\max}$$

Para estas dos curvas integrales las áreas parciales bajo las curvas serán iguales al área total.

Volviendo a las expresiones:

$$A_t = 12,5 \cdot \Delta V$$

y

$$\Delta V = \Delta v_e + \Delta v_p + \Delta v_r, \text{ sustituyendo}$$

$$A_t = 12,5 (\Delta v_e + \Delta v_p + \Delta v_r)$$

y

$$A_t = 12,5 \Delta v_e + 12,5 \Delta v_p + 12,5 \Delta v_r$$

La comprobación experimental se presenta en las Figs. 55, 56 y 50.

Por otra parte:

$$A_e = 12,5 \cdot \Delta v_e = f_{me} \Delta t_e \quad \underline{A_i = 12,5 \Delta v_i}$$

$$A_p = 12,5 \cdot \Delta v_p = f_{mp} \Delta t_p \quad f_{mi} = \frac{12,5 \Delta v_i}{t_i}$$

$$A_r = 12,5 \cdot \Delta v_r = f_{mr} \Delta t_r$$

análogamente

$$E_a = E_e + E_p + E_r = \frac{1}{2} M (v_o^2 - v_f^2)$$

$$E_e = \frac{1}{2} M (v_o^2 - v_e^2)$$

$$E_p = \frac{1}{2} M (v_e^2 - v_{ep}^2)$$

$$E_r = \frac{1}{2} M (v_{ep}^2 - v_f^2)$$

de la expresión:

$$E_i = M v_{mi} \cdot \Delta v_i \quad \text{y} \quad \delta_f = \Delta \delta_e + \Delta \delta_p + \Delta \delta_r$$

dimensionalmente se deben cumplir las siguientes relaciones

$$E_o = M v_{me} \Delta v_e$$

$$v_{me} \Delta t_e = \delta_e$$

$$E_p = M v_{mp} \Delta v_p \quad \text{y de}$$

$$v_{mp} \Delta t_p = \delta_p$$

$$E_r = M v_{mr} \Delta v_r$$

$$v_{mr} \Delta t_r = \delta_r$$

y

$$E_e = f_{me} v_{me} \Delta t_e = f_{me} \Delta \delta_e = \frac{M \cdot \Delta v_e \Delta \delta_e}{\Delta t_e} = \frac{A_e \Delta \delta_e}{\Delta t_e} 6,25$$

$$E_p = f_{mp} v_{mp} \Delta t_p = f_{mp} \Delta \delta_p = \frac{M \Delta v_p \Delta \delta_p}{\Delta t_p} = \frac{A_p \cdot \Delta \delta_p}{\Delta t_p} 6,25$$

$$E_r = f_{mr} v_{nr} \Delta t_r = f_{mr} \Delta \delta_r = \frac{M \Delta v_r \Delta \delta_r}{\Delta t_r} = \frac{A_r \Delta \delta_r}{\Delta t_r} 6,25$$

y

$$\delta_f = v_m(t) \cdot t_f$$

Las energías absorbidas hasta la condición dinámica de inestabilidad o de comienzo de propagación de la grieta, pueden ser medidas, pudiendo además conocerse la velocidad de absorción de energía,

$$\left[\frac{dE(t)}{dt} \right]_{ti} = \frac{M}{2} \left(\frac{dv^2(t)}{dt} \right)_{ti}$$

en una curva $v^2 = v^2(t)$, como una función del tiempo.

Del mismo modo se pueden calcular las flechas correspondientes a las etapas elásticas, plástica y de rotura, así como la flecha total, a partir de

$$\Delta \delta_i = \frac{6,25 E_i \Delta t_i}{A_i}$$

$$\Delta \delta_e = \delta_e = 6,25 \frac{E_e \Delta t_e}{A_e} ; \quad \delta_e = \Delta \delta_e + 0$$

$$\Delta\delta_p = \delta_{ep} - \delta_e = 6,25 \frac{E_p \Delta t_p}{A_p} ; \quad \delta_{ep} = \Delta\delta_p + \delta_e$$

$$\Delta\delta_r = \delta_f - \delta_{ep} = 6,25 \frac{E_r \Delta t_r}{A_r} \quad \delta_f = \Delta\delta_r + \delta_{ep}$$

$$\Delta\delta = \delta_f - 0 = 6,25 \frac{E_a \Delta t_f}{A_t}$$

Las que se pueden calcular a partir de datos experimentales de v_o , v_f , A_t y t . Otros parámetros de choque como fuerza, potencia, etc., desarrollados en un intervalo o totales también se pueden calcular a partir de datos experimentales.

En lugar de v_m , se podía utilizar otro parámetro, tal como el cociente, velocidad inicial entre velocidad media. En este caso el parámetro, n ,

$$n = \frac{v_{oi}}{v_{mi}}$$

Con los valores

$$1 \leq n \leq 2$$

para

$$E_a = 0 ; n = 1$$

$$E_a = E_g ; n = 2$$

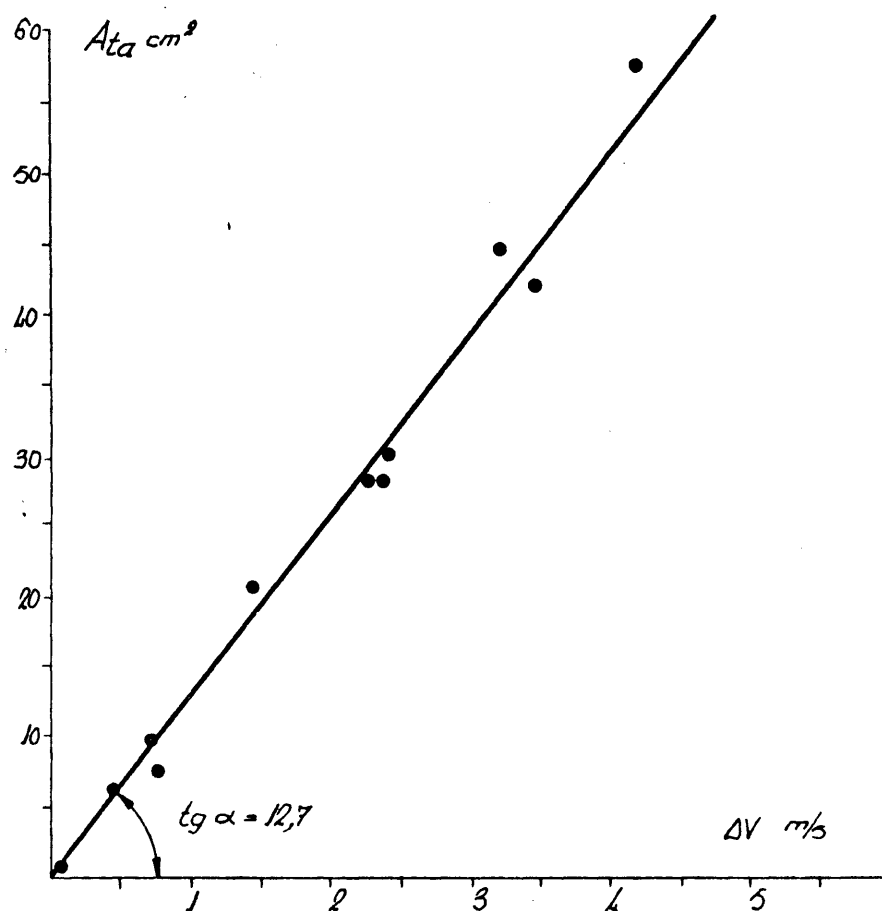


Fig.52 El área bajo los pulsos es directamente proporcional a la pérdida de velocidad que experimenta el martillo en el choque.

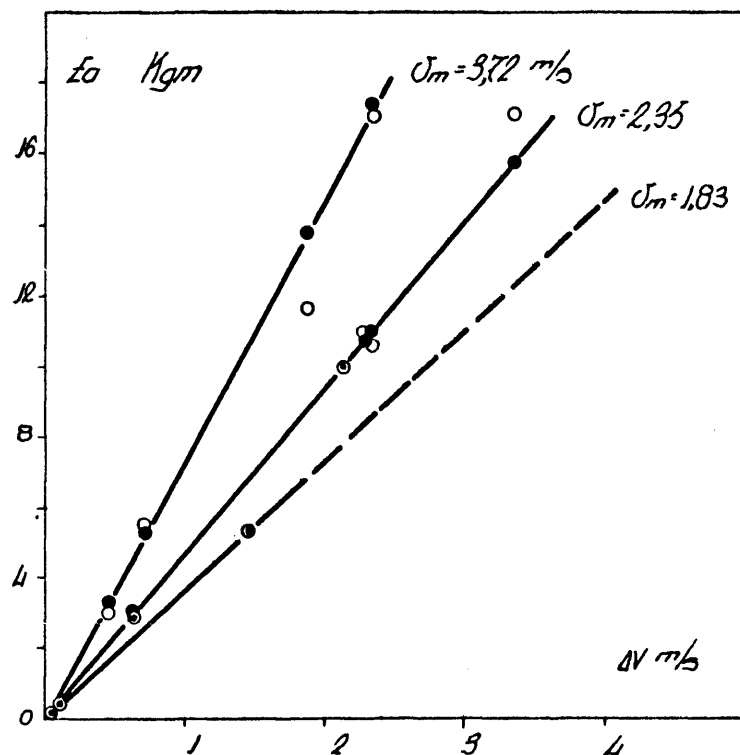
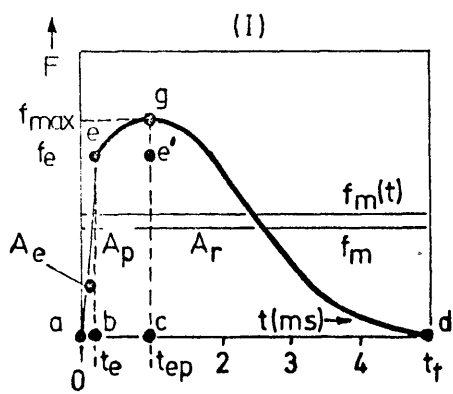


Fig.53 Confirmación experimental de la expresión (Energía absorbida en la rotura-pérdida de velocidad del martillo), en roturas obtenidas a $v_m = \text{cte.}$



$$f_m = \frac{f_{max.}}{2}$$

$$f_m(t) = A_{t_0} / t_r$$

$$be = \Delta f_e$$

$$e'g = \Delta f_p$$

$$gc = \Delta f_r$$

$$ab = \Delta t_e$$

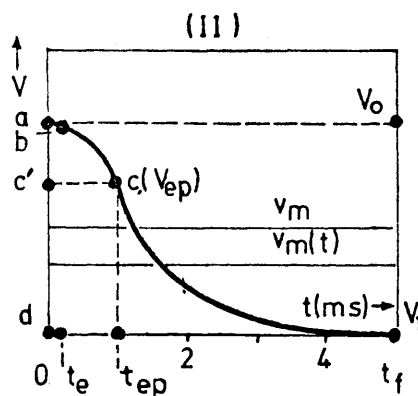
$$bc = \Delta t_p$$

$$cd = \Delta t_r$$

$$0 = \Delta f_e + \Delta f_p + \Delta f_r$$

$$t_f = \Delta t_e + \Delta t_p + \Delta t_r$$

$$A_t = A_e + A_p + A_r$$



$$ab = \Delta V_e$$

$$bc' = \Delta V_p$$

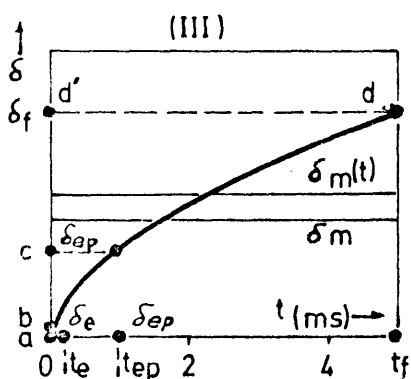
$$c'd = \Delta V_r$$

$$V_m = \frac{V_o + V_f}{2}$$

$$V_m(t) = A_{t_0} / t_f$$

$$V_o > V_f$$

$$\Delta V = \Delta V_e + \Delta V_p + \Delta V_r$$



$$ab = \Delta \delta_e$$

$$bc = \Delta \delta_p$$

$$cd' = \Delta \delta_r$$

$$\delta_m = \delta_f / 2$$

$$\delta_m(t) = A_{\delta t_0} / t_f$$

$$\delta_f = \Delta \delta_e + \Delta \delta_p + \Delta \delta_r$$

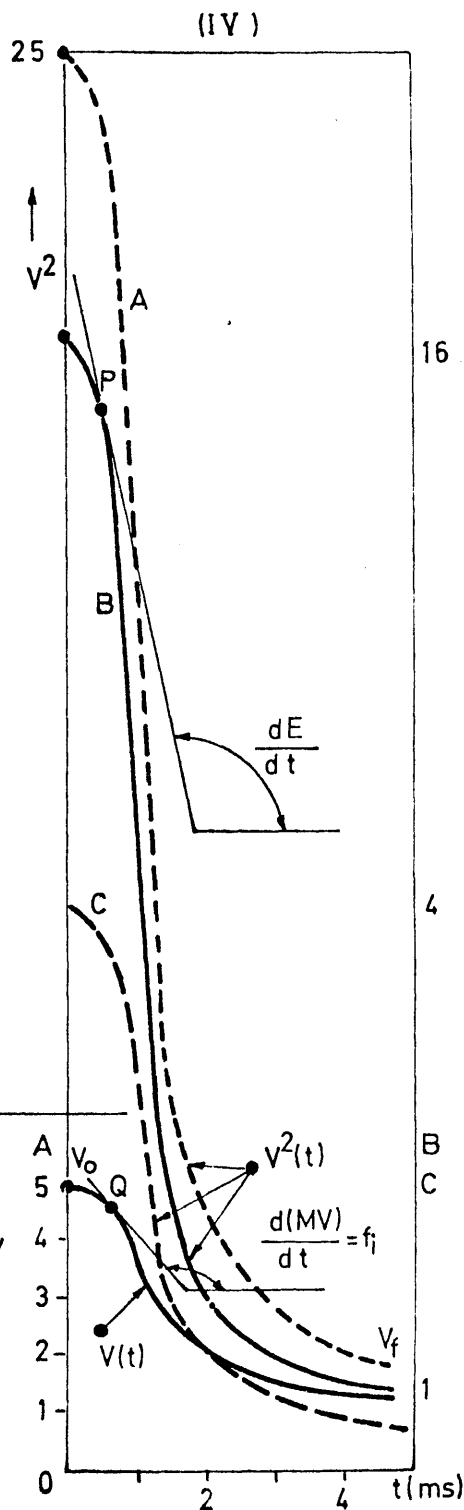


Fig. 54

Variables y conjunto de datos obtenibles de un pulso fuerza-tiempo, (I); y de sus dos primeras curvas integrales, (II) y (III); así como de la energía en función del tiempo, (IV).

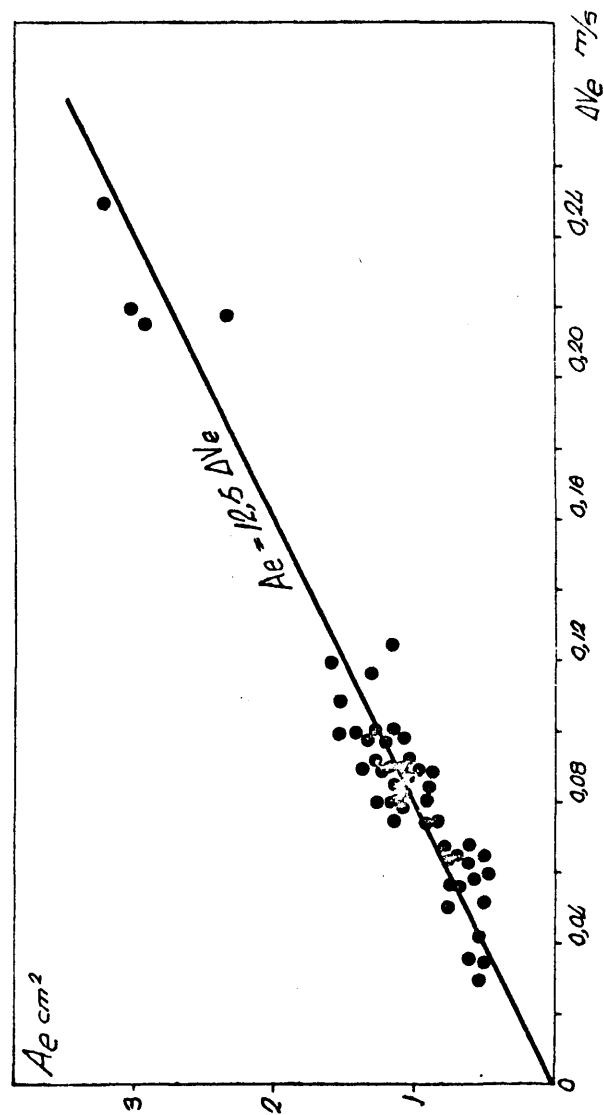


Fig.55 Comprobación experimental de la relación
 $A_e = 12.5 \cdot \Delta V_e$.

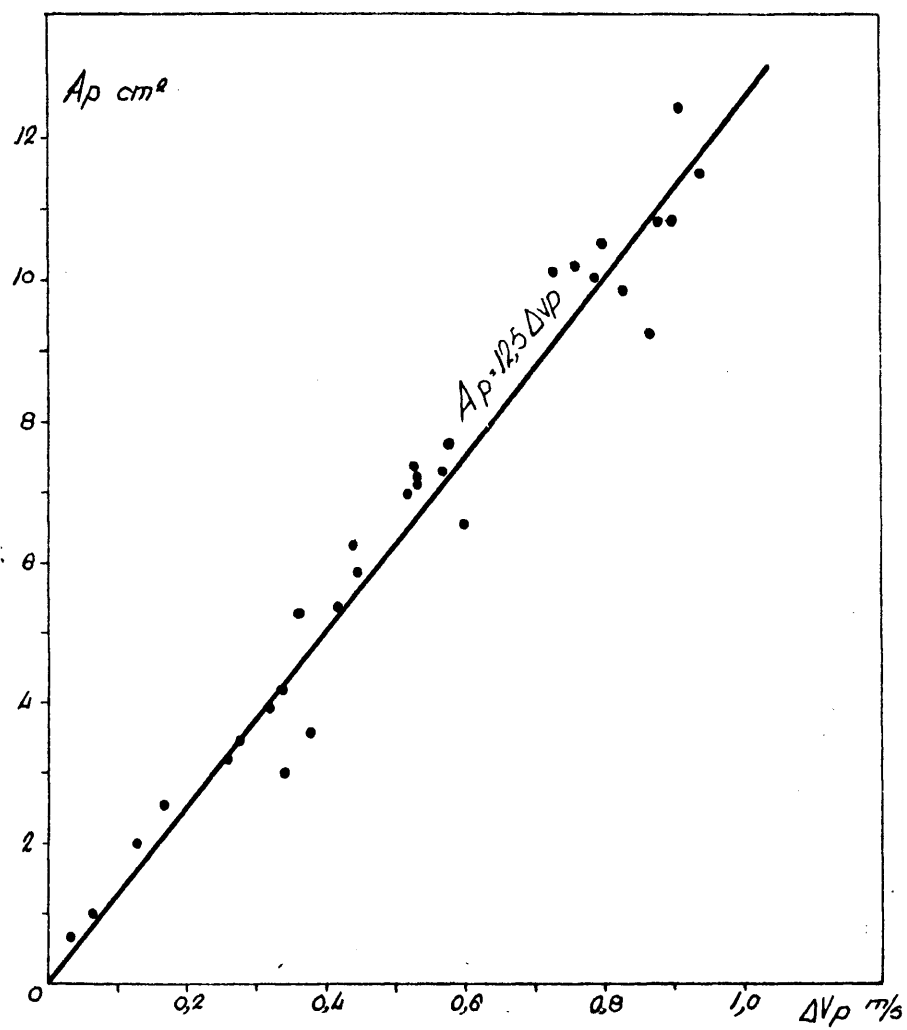


Fig. 56 Comprobación experimental de la relación:
 $A_p = 12.5 \cdot \Delta V_p$.

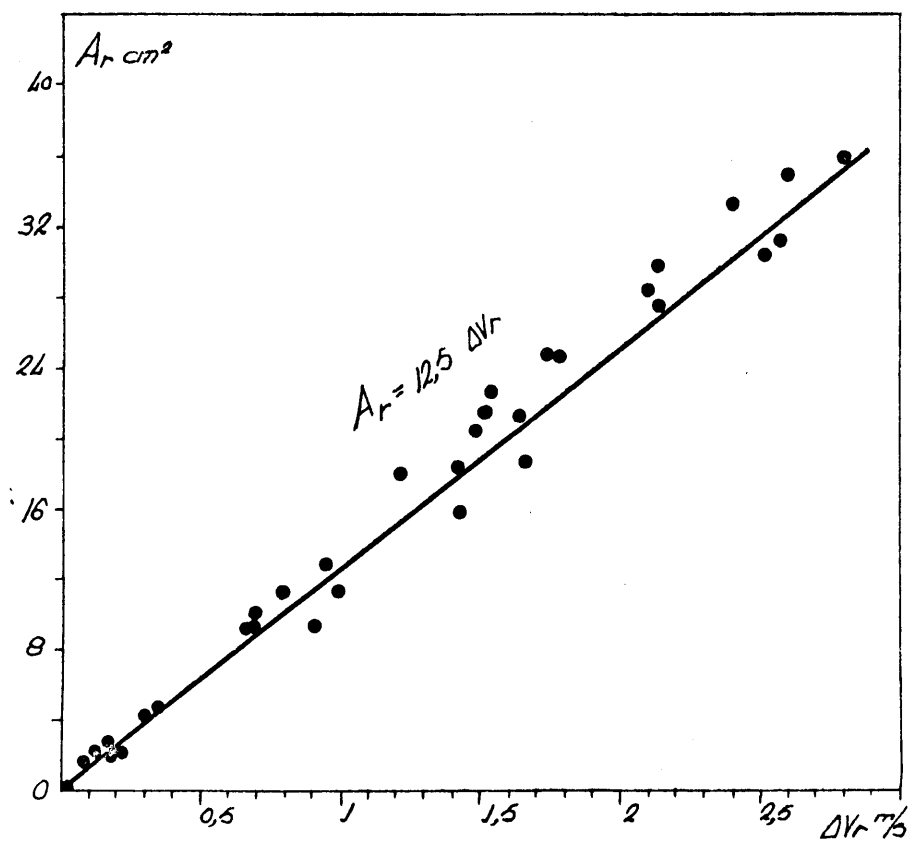


Fig. 57 Comprobación experimental de la relación:
 $A_r = 12.5 \cdot \Delta V_r$.

VII.- CALCULO DE LA ENERGIA REAL ABSORBIDA.

7.1.- REVISION DE LOS TRABAJOS PUBLICADOS.

Aunque se considera a Sakui como al que incorporó las "strain gauges", por primera vez, a un péndulo Charpy para el análisis de choques con deformación y rotura, mediante registros obtenidos en un equipo electrónico, (17) parece ser que, pese a esta publicación más difundida, hubo una rusa y otra de B. Augland (18) que no tuvieron la difusión del trabajo de Sakui, pero que datan de 1957, en las que se aprecia la utilidad de esta técnica, para efectuar medidas de la energía de propagación de una rotura.

Aparte de algunas publicaciones sobre péndulos instrumentados varias casas comerciales, de Estados Unidos y Europa, ofrecen péndulos instrumentados pero siempre y hasta la fecha sin conocerse ningún análisis dinámico-energético detallado del choque con deformación y rotura y sin las correlaciones existentes entre las magnitudes instantáneas e integrales, tal como se discuten en este trabajo, publicándose en (13, 18 y 19) las únicas sugerencias sobre una relación de las que se han de cumplir, y que han sido confirmadas por ellos y otros trabajos posteriores.

7.2.- CORRECCION DE B. AUGLAND.

En los trabajos (13, 18, 19 y 20) se revisa una expresión que permite calcular una "energía real corregida" a partir de otra energía calculada suponiendo que durante el choque la velocidad del martillo permanece constante e igual a la velocidad inicial, v_0 , con la que el martillo entra en contacto con la probeta.

Tal expresión es:

$$E_a = E'_a - \frac{(E'_a)^2}{4 E_g}$$

donde: E_a = es la denominada "energía real corregida."

E'_a = energía calculada a partir de la curva, fuerza-tiempo, suponiendo la velocidad de choque, v_0 , constante.

E_g = energía aplicada.

Esta expresión fue deducida por B. Augland (*) y permite el cálculo de la energía de un choque con rotura a partir de la información que suministra el pulso registrado. Ambas deducciones figuran en el Apéndice **XX- XXII**.

Conviene precisar que en la ec. (51), se admite que el impulso o pérdida de la cantidad de movimiento del martillo es igual al área bajo la curva fuerza-tiempo. En caso de

(*) Comunicación particular.

que hubiera pérdidas de velocidad del martillo no detectables por los extensímetros eléctricos, entonces

$$A_t = \int_0^f F(t) dt < M \Delta v$$

Si se admite que el área bajo el pulso es igual al impulso mecánico del martillo, se llega a la corrección de B. Augland. En casos en que la energía calculada resulte menor se aplicará otra corrección.

$$\text{Si } \int_0^f F(t) dt = f_m \cdot t_f = M \cdot \Delta v \equiv A_t \quad (51)$$

Siendo

$F(t)$ = la curva del pulso registrado

t_f = el tiempo total del choque

f_m = la ordenada media del pulso

A_t = área bajo el pulso

v_0 = velocidad del martillo cuando comienza el choque

v_f = velocidad del martillo cuando finaliza el choque

M = masa del martillo

Esta misma ecuación se puede escribir

$$A_t \cdot v_0 = M \cdot \Delta v \cdot v_0 = f_m \cdot t_f \cdot v_0 = E'_a$$

donde

E'_a = energía cedida por el martillo, suponiendo que el choque tuviera lugar a velocidad v_0 , constante.

Denotando por E_a , la verdadera energía cedida por el martillo o "energía real corregida", como también se la denomina, se tiene

$$E'_a - E_a = M \cdot \Delta v \cdot v_o - \frac{1}{2} M (v_o^2 - v_f^2)$$

Despejando E_a se puede escribir

$$E_a = E'_a - \frac{M \cdot (\Delta v) \cdot M v_o^2}{4(\frac{1}{2} M v_o^2)}$$

y como,

$$\frac{1}{2} M v_o^2 = E_g$$

$$M^2 (\Delta v)^2 \cdot v_o^2 = (E'_a)^2$$

resulta

$$E_a = E'_a - \frac{(E'_a)^2}{4 E_g} \quad (52)$$

siendo, E_g = energía aplicada a la probeta.

Varios investigadores han comprobado esta expresión y por lo tanto la denominada "energía real corregida", que no es otra que la energía cedida por el martillo, es igual a la que se lee en la máquina de ensayo.

No se ha mencionado en la ec. 52, que para el cálculo de E'_a es preciso aplicar

$$E'_a = k \cdot v_o \cdot A_t$$

donde k sería una constante que procede del calibrado de los ejes X e Y, del pulso, en kg/cm y cm/milisegundos. En nuestro caso valen:

$$\begin{aligned}\varphi &= 415 \text{ kg/cm} \\ a &= 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}\end{aligned}$$

resultando,

$$E'_a = 0,16 \cdot v_o \cdot A_t \quad (53)$$

por lo que es necesario el empleo de la ec. 53, para calcular la denominada "energía real corregida" que se puede calcular de una manera más directa teniendo en cuenta que

$$v_m = \frac{1}{\Delta v} \int_{v_o}^{v_f} v dv = \frac{v_o + v_f}{2}$$

y que de

$$\begin{aligned}\frac{\varphi}{a} A_t &= M \Delta v \cdot 10^3 \\ \frac{\varphi}{a} 10^{-3} A_t &= \frac{M}{2} (v_o^2 - v_f^2) \frac{1}{v_m}\end{aligned}$$

de donde

$$E_a = 0,16 \cdot v_m \cdot A_t \quad (54)$$

La ec. 54, (Fig. 58), es igual a la ec. 53, cambiando v_0 por v_m . Pero de nuevo aquí son necesarias dos ecuaciones pues se precisa calcular v_m , según,

para $M = 2,0$; U.T.M.

$$v_m = \frac{\sqrt{E_g} + \sqrt{E_g - E_a}}{2}$$

y sustituyendo en la ec. 54

$$E_a = 0,16. \sqrt{E_g} \cdot A_{ta} - 6,4 \cdot 10^{-3} A_{ta}^2 \quad (55)$$

con lo que es suficiente, una vez calibrado el péndulo, el par de valores (E_g, A_{ta}) para el cálculo de la energía cedida por el martillo en un choque con rotura, mediante la ec. 55.

7.3.- CORRECCION DE PERDIDAS NO DETECTABLES POR LOS EXTENSIMETROS ELECTRICOS.

Hasta ahora se vio como se puede calcular la energía que cede el martillo, pero esto no significa necesariamente que toda esta energía la absorba la probeta, pues es indudable que existen numerosas causas que originan pérdidas de energía no atribuibles a la energía que absorbe la probeta.

Si se tiene en cuenta que un pulso o registro fuerza-tiempo, es representativo de la fuerza que soporta la probeta en el choque, en cada instante de su duración y que la energía que cede el martillo se calcula, según vimos,

$$E_a = M \Delta v \cdot v_m$$

de la ec. 53, y de ésta resulta

$$C \% = \frac{E_{ap}}{E_a} = \frac{0,16 \cdot A_t}{M \Delta v} \cdot 100$$

$$C \% = k \frac{A_t}{\Delta v} \quad (56)$$

en la que C es una relación energética en %, cuyo numerador depende únicamente del área bajo el pulso, mientras que el denominador depende de la pérdida de velocidad que experimenta el martillo en el choque, o sea, que representa la energía cedida por el martillo.

$$\text{Si, } E_{ap} = C. E_a \quad ; \quad E = E_a - E_{ap}$$

Entonces

E_{ap} sería una energía real

E_a = la energía cedida por el martillo

E = energía perdida en el choque y no detectable por los extensímetros eléctricos.

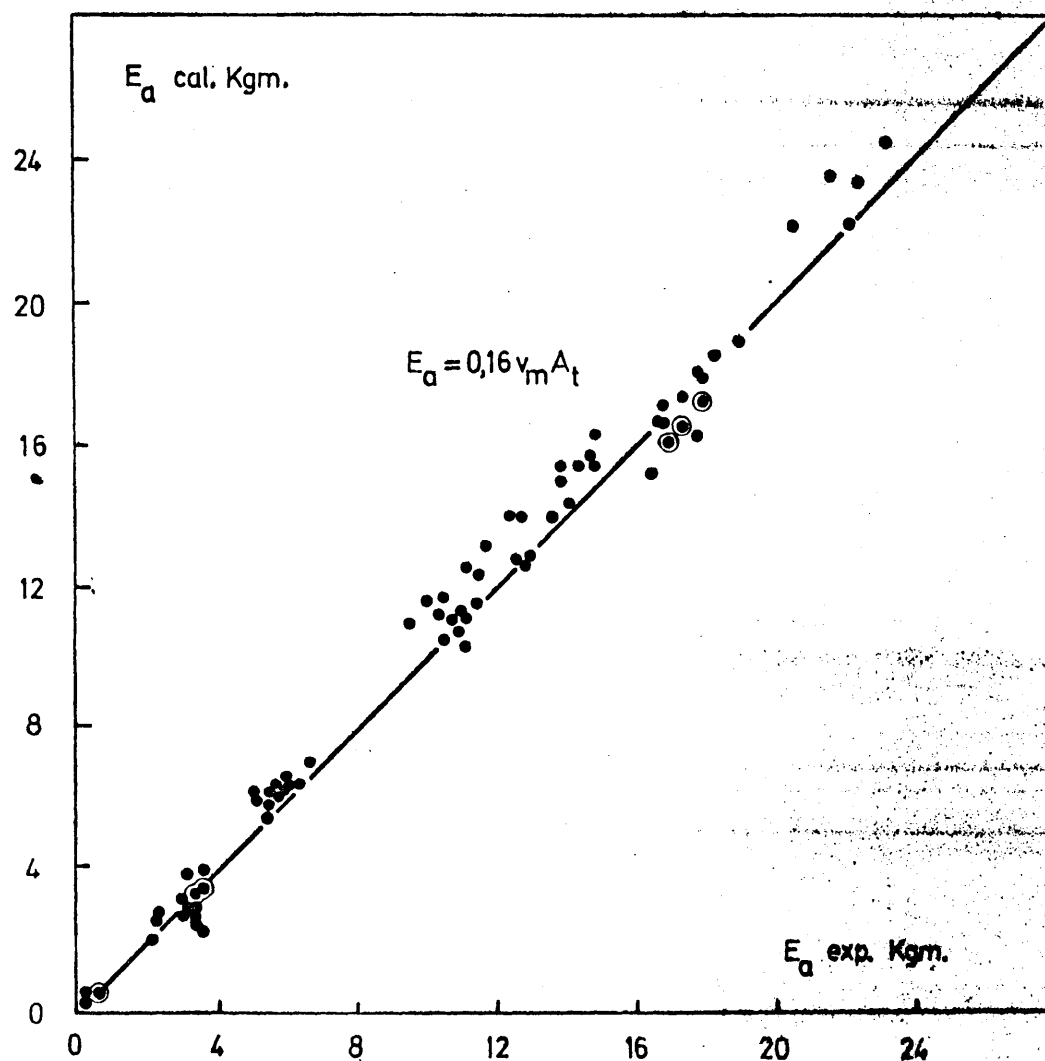


Fig.58 Representación de la energía calculada mediante la expresión, $E_a = 0,16 v_m A_t$, frente a la energía que suministra la máquina Charpy, correspondientes a la mismas roturas.

VIII.- ESTIMACION DE LA TENACIDAD DE ROTURA

8.1.- POSIBILIDAD DE MEDIR LA TENACIDAD DE ROTURA CON UN PENDULO INSTRUMENTADO: TIPOS DE FRACTURAS.

Se plantea el problema de saber si es posible efectuar medidas de tenacidades de rotura dinámicas, con un péndulo Charpy instrumentado y sin otra técnica experimental, utilizando la información que suministra este equipo. Dicha información consiste en dos tipos de registros oscillográficos, que proporcionan pulsos, correspondientes a cada choque. Pueden obtenerse dos tipos de pulsos:

- 1º) Pulsos en los que se registra la fuerza que ejerce el martillo sobre la probeta en función del tiempo que dura el choque.
- 2º) Pulsos que registran la fuerza en función de la pseudoflecha o recorrido del martillo.

Ambos tipos de pulsos se presentan esquematizados en la Fig. 59. En esta figura se presenta un pulso registrado, fuerza-tiempo (ó deceleración que experimenta la masa del martillo en el choque a través del tiempo que dura el mismo). La curva inmediatamente inferior es la 1ª curva integral, que representa la variación de velocidad que va experimentando el martillo durante el choque, desde v_0 (velocidad con la que entra en contacto con la probeta) hasta v_f , que es la velocidad que posee el martillo al finalizar la rotura. La tercera curva es la integral de la inmediata anterior, y representa la pseudoflecha o recorrido del martillo en función del tiempo. El último pulso corresponde a un regis-

tro directo fuerza-flecha.

En el pulso (a) cuando se alcanza la carga máxima, después de transcurrir un tiempo OA' desde el comienzo del choque, tiene lugar la autopropagación de una grieta frágil, que dura un tiempo muy corto $A' C'$. Análogamente en este intervalo $A' C'$, el martillo se mueve de v_A' a v_C' , m/s, (b) y el aumento de flecha o recorrido del martillo será en (C) de (ac) mm.

Consideremos los pulsos que se representan esquemáticamente en la Fig. 60 y el aspecto macrográfico de las fracturas correspondientes a cada tipo de pulso.

Se distinguen:

Pulsos del tipo A_1 y A_2

Los pulsos para este tipo de roturas indican que la autopropagación tiene lugar cuando se alcanza una carga máxima, F_A . Sin embargo el aspecto de las fracturas es diferente. En A_1 , la fractura es de un 100% de aspecto cristalino, y corresponde a una probeta rota a baja temperatura, y con una absorción de energía en el choque muy baja. La fractura A_2 corresponde al mismo tipo de pulso, pero resulta de una rotura a temperatura ambiente de baja absorción de energía y presenta un pequeño porcentaje de fractura en forma de labios cortantes. En A_2 , la zona rayada de la fractura, aunque no tiene un claro aspecto cristalino, es una zona plana a la que se le atribuye carácter de fractura frágil, dados los surcos radiales que presenta (16).

Pulsos del tipo B_1 y B_2

Análogamente, el tipo de pulso es aquí, el mismo para

las fracturas B_1 y B_2 , diferentes.

La autopropagación comienza cuando se alcanza una carga máxima, F_B , Fig. 60, y se detiene a una carga $F_S > 0$, progresando luego la rotura con carácter tenaz hasta carga nula. La fractura B_1 , que corresponde a una rotura a temperatura moderadamente baja (zona de transición, según cada acero), presenta un porcentaje de fractura cristalino, mientras que fracturas como la B_2 , que dan el mismo tipo de pulso B_1 y que han sido rotas a la temperatura ambiente no presentan aspecto cristalino claro, aunque sí una zona central plana, (zona rayada en B_2).

Pulsos del tipo C_1 y C_2

En pulsos del tipo C_1 la autopropagación comienza a una carga $F_R < F_C$, después de sobrepasada la carga máxima F_C . La rotura progresa con carácter frágil y se detiene a una carga $F_S > 0$, finalizando la rotura con carácter tenaz hasta una carga nula. De nuevo se observan dos tipos de fracturas. La fractura C_1 presenta un pequeño porcentaje de cristalinidad y corresponde a roturas en la zona de transición, mientras que la fractura C_2 se observa en roturas a la temperatura ambiente, en ella la zona central plana (zona rayada) presenta aspecto frágil por sus surcos radiales, aunque no presente una cristalinidad bien definida.

Pulsos del tipo CA

Este tipo de pulso, Fig. 60 , ha sido observado en roturas a temperatura ambiente y morfológicamente se considera como un pulso mixto de los tipos C y A, dado que la autopropagación comienza, una vez rebasada la máxima carga alcanzada F_{CA} , a una carga $F_R < F_{CA}$, y continúa hasta carga nula. La fractura presenta un aspecto plano central con surcos radiales (zona rayada).

Pulsos del tipo D

Estos pulsos corresponden a roturas de gran absorción de energía, a temperatura ambiente o superiores a ella y según el tipo de acero. Sus fracturas presentan un inconfundible aspecto, de gran tenacidad y no tiene interés su análisis desde el punto de vista de la rotura frágil.

Hasta aquí se han presentado varios tipos de pulsos o^o racterísticos y frecuentes sin pretender agotar todas las formas posibles. Se trata de poner de manifiesto la relación que existe entre tipos de pulsos y aspectos de fractura y especialmente que los tramos de caída rápida de la carga (propagación frágil) se corresponden con porcentajes de áreas cristalinas de fractura o áreas planas con surcos radiales, lo que constituye la idea básica para el desarrollo de expresiones que permiten el cálculo de la tenacidad de rotura.

8.2.- PROPORCIONALIDAD DIRECTA ENTRE LA CAIDA BRUSCA DE LA CARGA Y EL PORCENTAJE DE FRACTURA FRÁGIL.

En (16), se han efectuado determinaciones de porcentajes de fractura frágil en relación con pulsos registrados correspondientes a series de probetas destinadas a obtener curvas de temperaturas de transición.

También se demuestra que existe una directa proporcionalidad, Fig. 10, entre la caída de la carga respecto a la fuerza máxima alcanzada en un pulso y el porcentaje de fractura frágil que presenta la probeta rota y examinada macrográficamente, (20) de tal manera que para los tipos de pulsos clasificados se cumple:

$$\begin{aligned}
 \text{Tipo (A)} \quad & \frac{\Delta F_A}{F_A} 100 = \frac{\Delta a.e_A}{0,8} 100 = 1 \\
 \text{(B)} \quad & \frac{\Delta F_B}{F_B} 100 = \frac{\Delta a.e_B}{0,8} 100 < 1 \\
 \text{(C)} \quad & \frac{\Delta F_C}{F_C} 100 = \frac{\Delta a.e_C}{0,8} 100 < 1
 \end{aligned} \tag{57}$$

El significado de las letras se describe en las Figs.60 y 61 , donde:

$(\Delta F_1/F_1) 100$: son los porcentajes de caída de carga correspondientes a propagaciones frágiles.

a : longitud recorrida por la grieta frágil.

e_1 : ancho medio, en el plano de fractura, que macrográficamente presenta la zona de aspecto de fractura frágil.

0,8 cm: espesor de la probeta desde el fondo de la entalla hasta la carga opuesta, o también sección neta de la probeta.

Análogamente para el pulso mixto y según las Figs. 60 y 61 se tiene

$$(CA) \quad \frac{\Delta F_{CA}}{F_{CA}} 100 = \frac{\Delta a.e_{CA}}{0,8} 100 < 1$$

8.3.- EXPRESION DE LA FUERZA EN FUNCION DE LA LONGITUD DE GRIETA INSTANTANEA.

Admitiendo en la Fig. 61 que los tramos de brusca caída de la carga, $(F_A S_A)$, $(F_B F_S)$, $(F_R F_S)$, para los tipos de pulsos A, B y C, respectivamente, son líneas rectas, se pueden escribir sus ecuaciones, conservando la nomenclatura de dichas figuras, según:

$$(A) \quad \frac{F_1}{F_A} + \frac{t_1}{t_r} = 1 \quad 0 = t_a \leq t_1 \leq t_r$$

$$(B) \quad \frac{F_1 - F_S}{F_B - F_S} + \frac{t_1}{t_s} = 1 \quad 0 = t_b \leq t_1 \leq t_s \quad (58)$$

$$(C) \quad \frac{F_1 - F_S}{F_R - F_S} + \frac{t_1}{t_s} = 1 \quad 0 = t_R \leq t_1 \leq t_s$$

En estas expresiones y en las sucesivas el tiempo t_1 , variable, está comprendido entre el tiempo t_a , t_b o t_R , a los que comienza la autopropagación y los tiempos t_r , t_s y t_s , a los que finaliza la propagación frágil, y que por lo tanto no tienen por qué coincidir con los tiempos a los que se alcanza la máxima carga o a los que finaliza el pulso. De la Fig. 61, se tiene

$$(A) \quad \Delta F_1 = F_A - F_1 \quad \Delta F_A = F_A$$

$$(B) \quad \Delta F_1 = F_B - F_1 \quad \Delta F_B = F_B - F_S \quad (59)$$

$$(c) \quad \Delta F_1 = F_R - F_1 \quad \Delta F_0 = F_R - F_S$$

de las ecs. 58 y 59 ,

$$\Delta F_1 = \left(\frac{F_A}{t_r} \right) t_1$$

$$\Delta F_1 = \left(\frac{F_B - F_S}{t_s} \right) t_1 \quad (60)$$

$$\Delta F_1 = \left(\frac{F_R - F_S}{t_s} \right) t_1$$

Los paréntesis de las ecs. 60 toman valores constantes para cada pulso.

Supongamos que para una caída ΔF_1 de la carga la grieta frágil ha progresado una longitud Δa_1 ; en este instante el area intercristalina formada será $(\Delta a_1 \cdot e_1) \text{ cm}^2$.

Siguiendo con los tres tipos de pulsos se tendrá:

$$\frac{\Delta F_1}{F_A} = \frac{a_1 \cdot e_A}{0,8}$$

$$\frac{\Delta F_1}{F_B} = \frac{a_1 \cdot e_B}{0,8} \quad (61)$$

$$\frac{\Delta F_1}{F_C} = \frac{a_1 \cdot e_C}{0,8}$$

De las ecs. 60 y 61 se pueden deducir expresiones para la velocidad de propagación de las grietas frágiles,

$$\frac{t_i}{t_r} = \frac{a_i \cdot e_A}{0,8} ; \quad v_g = \frac{a_i}{t_i} = \frac{0,8}{e_A t_r} = c^{te}$$

$$\frac{t_i}{t_s} = \frac{a_i e_B}{0,8} \frac{F_B}{F_B - F_S}; \quad v_g = \frac{0,8}{t_s} \frac{\Delta F_B}{e_B F_B} = c^{te} \quad (62)$$

$$\frac{t_i}{t_s} = \frac{a_i \cdot e_C}{0,8} \frac{F_C}{F_R - F_S}; \quad v_g = \frac{0,8}{t_s} \frac{\Delta F_C}{e_C F_C} = c^{te}$$

Con lo que resultan velocidades constantes (v_g), para la propagación de las respectivas grietas frágiles, en función de datos característicos de cada pulso fuerza-tiempo.

Según estas expresiones, algunas de las velocidades de propagación de grietas que resultan son

Desig.	v_g m/s	Desig.	v_g m/s	Desig.	v_g m/s
4	200	14	160	M- 11	51
4'	200	16	80	M- 15	46
5	267	24	114	M- 18	77
8	133	M-1	78	E- 2	66
12	100	M-6	57	E- 19	69

Expresando las ecuaciones de las rectas en función de la longitud de la grieta, se tiene de las ecs 58, 59 y 62

$$F_i = F_A (1 - 1,25 e_A a_1)$$

$$F_i = F_B (1 - 1,25 e_B a_1) \quad (63)$$

$$F_i = F_R - 1,25 e_C F_C a_1$$

8.4.- EXPRESION DE LA FLECHA EN FUNCION DE LA LONGITUD DE GRIETA INSTANTANEA.

El valor instantáneo de la flecha δ_1 , o recorrido del martillo, se puede expresar según:

$$\text{tipo (A)} \quad \delta_1 = \delta_A + \Delta\delta_A$$

$$(B) \quad \delta_1 = \delta_B + \Delta\delta_B \quad (64)$$

$$(C) \quad \delta_1 = \delta_R + \Delta\delta_C$$

siendo δ_A, B, R , las flechas o recorridos del martillo hasta el instante en que se alcanzan las cargas F_A, F_B y F_R , respectivamente, de autopropagación, y $\Delta\delta_A, B, R$ el aumento de flecha que tiene lugar durante los respectivos intervalos de tiempo que dura la propagación frágil.

Para pulsos del tipo A, y también en otros casos,

$$\Delta\delta \ll \delta$$

con lo que una primera aproximación sería despreciar el valor de $\Delta\delta$.⁽¹⁾

En pulsos del tipo B y C, $\Delta\delta_{B, R}$ toma valores no despreciables frente a $\delta_{B, R}$, respectivamente, por lo que δ_1 , se expresa en función de t_1 según,

(1) Condición de amarres fijos (21)

$$\delta_1 = \delta_A + v_A t_1$$

$$\delta_1 = \delta_B + v_B t_1 \quad (65)$$

$$\delta_1 = \delta_R + v_C t_1$$

siendo v_A, v_B, v_C , las respectivas velocidades medias del martillo ligado mecánicamente a la probeta, en los intervalos de tiempo que tiene lugar la propagación frágil y que pueden ser calculadas de la información que suministran las primeras curvas integrales de los pulsos fuerza-tiempo. En la Fig. 62, se dan valores típicos de las velocidades iniciales y finales del martillo (v_o y v_f), a dos niveles extremos de carga aplicada, es decir, según se le apliquen a una probeta 30 kgm. o la mínima energía para romperla. Las velocidades v_A, v_B, v_C , valdrán, Fig. 62.

$$v_A = \frac{1}{\Delta V_A} \int_{t_a=0}^{t_r} v(t) dt = \frac{v_a + v_f}{2}$$

$$v_B = \frac{1}{\Delta V_B} \int_{t_b=0}^{t_s} v(t) dt = \frac{v_b + v_s}{2} \quad (66)$$

$$v_C = \frac{1}{\Delta V_C} \int_{t_R=0}^{t_s} v(t) dt = \frac{v_R + v_s}{2}$$

Siendo v_a , v_b y v_R , las velocidades del martillo cuando comienza la autopropagación y v_f y v_g las velocidades cuando finaliza la propagación de carácter frágil. Como se ve en la Fig. 62 se toman para $v_{A,B,C}$, valores medios de velocidad en lugar de la velocidad media en función del tiempo, que sería la ordenada media de las zonas doblemente rayadas, lo que en principio simplifica el cálculo de dichas velocidades. (Conviene tener en cuenta, que al tomar estas velocidades, como semisumas de velocidades extremas, se está tomando un valor ligeramente más alto, que el correspondiente a la ordenada media, obtenida por integración de la zona rayada y dividiendo esta área por la correspondiente abscisa. Más adelante pueden resultar valores de G'_0 ligeramente más altos de los adecuados en algunos casos).

Usando las ecs. 62, para expresar los valores de t_1 de las ecs. 65, en función de la longitud de la grieta, resulta

$$\begin{aligned}\delta_1 &= \delta_A + 1,25 e_A v_A t_r a_1 \\ \delta_1 &= \delta_B + 1,25 e_B v_B t_s \frac{F_B}{\Delta F_B} a_1 \\ \delta_1 &= \delta_R + 1,25 e_C v_C t_s \frac{F_C}{\Delta F_C} a_1\end{aligned}\quad (67)$$

8.5.- EXPRESIONES DE LA ACOMODACION EN FUNCION DE LA LONGITUD DE LA GRIETA.

Según la teoría de Irwin, la acomodación, o inversa de un módulo secante (M), es una función de la longitud de la grieta,

$$\left(\frac{1}{M}\right)_{A,B,C} = \frac{(\delta_1)_{A,B,C}}{(F_1)_{A,B,C}} = f(a_1)_{A,B,C} \quad (68)$$

Tomando las ecs. 67 y 63, para los numeradores y denominadores de la ec. 68, resulta

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{M}\right)_A &= \frac{\delta_A + 1,25 e_A t_r a_1}{F_A (1 - 1,25 e_A a_1)} \\ \left(\frac{1}{M}\right)_B &= \frac{\delta_B + 1,25 e_B v_B t_s \frac{F_B}{\Delta F_B} a_1}{F_B (1 - 1,25 e_B a_1)} \\ \left(\frac{1}{M}\right)_C &= \frac{\delta_R + 1,25 e_C t_s \frac{F_C}{\Delta F_C} a_1}{F_R - 1,25 e_C F_C a_1} \end{aligned} \quad (69)$$

que son las expresiones de la acomodación en función de la longitud de la grieta instantánea (a_1) y de constantes características y medibles en cada pulso o calculables de su primera curva integral.

La representación gráfica de las ecs. 69 conduce a curvas de la acomodación en función de la longitud de la grieta

ta que son del mismo tipo que las publicadas en otros trabajos. En lastablas siguientes se presentan algunos valores experimentales y las funciones $\left(\frac{1}{M}\right) = f(a)$ para los casos A_1 y A_2 , que son de la forma

$$\frac{1}{M} = \frac{A + B a}{(1 - C a)}$$

Siendo A, B y C constantes características de cada pulso y correspondientes a cada rotura.

PULSOS TIPO A₁. (e_A = 1).

Desig.	δ_A cm. 10 ⁻²	v _A cm/s	t _r ms. 10 ⁵	F _A kg. 10 ⁻³	$\left(\frac{1}{M}\right) = f(a)$ (cm/kg). 10 ⁵	[1]
4	2,45	135	4,0	2,08	(1,22 + 0,32 a) /	(1-1,25 a)
5	2,62	128	3,0	2,14	(1,26 + 0,22 a) /	(1-1,25 a)
8	2,23	180	6,0	1,72	(1,30 + 1,35 a) /	(1-1,25 a)
12	3,10	223	8,0	2,06	(1,50 + 1,08 a) /	(1-1,25 a)
16	3,58	237	10,0	1,87	(1,91 + 1,58 a) /	(1-1,25 a)
24	4,41	543	7,0	2,21	(2,00 + 2,15 a) /	(1-1,25 a)

PULSOS TIPO A_2 ($e_A < 1$)

Desig.	δ_A cm. 10^{-2}	v_A cm/s.	t_r ms. 10^4	e_A cm.	F_A Kg. 10^{-3}	$\frac{1}{M} = f(a)$ cm/Kg. 10^{-5} [2]
M-1	9,7	112	1,2	0,86	3,86	(2,51+0,37a)/(1-1,07a)
M-6	9,6	187	1,6	0,87	4,11	(2,33+0,83a)/(1-1,08a)
M-11	9,8	191	1,8	0,87	4,52	(2,17+0,83a)/(1-1,08a)
M-15	9,5	338	2,0	0,86	4,52	(2,10+1,60a)/(1-1,07a)

8.6.- EXPRESIONES PARA LA TENACIDAD DE ROTURA SEGUN EL TIPO DE PULSO.

Para aplicar la ecuación de validez general dada por Irwin (7) es necesario conocer las expresiones de

$$\frac{d}{da} \left(\frac{1}{M} \right)_{A,B,R}$$

De las ecs. 69, resulta,

$$\frac{d}{da} \left(\frac{1}{M} \right)_A = \frac{e_A (\sigma_A + v_A t_r)}{0,8 F_A} \frac{1}{(1-1,25 e_A a_1)^2}$$

$$\frac{d}{da} \left(\frac{1}{M} \right)_B = \frac{e_B (\sigma_B + v_B t_s \frac{F_B}{\Delta F_B})}{0,8 F_B} \frac{1}{(1-1,25 e_B a_1)^2} \quad (70)$$

$$\frac{d}{da} \left(\frac{1}{M} \right)_C = \frac{e_C F_C (\sigma_R + v_C t_s \frac{F_R}{\Delta F_C})}{0,8} \frac{1}{(F_R-1,25 e_C F_C a_1)^2}$$

De las funciones tabuladas para $\left(\frac{1}{M} \right) = f(a)$, columnas [1] y [2], se obtienen por derivación las siguientes expresiones para $\frac{d}{da} \left(\frac{1}{M} \right) = f(a)$, que dan lugar a funciones del tipo

$$\frac{d}{da} \left(\frac{1}{M} \right) = \frac{D}{(1 - Ca)^2}$$

Pulsos tipo	Desig.	$\frac{d}{da} \left(\frac{1}{M} \right) = f(a)$
	4	$1,84 / (1-1,25 a)^2$
A_1	16	$3,97 / (1-1,25 a)^2$

Conviene ahora expresar el valor de la longitud de la grieta (a_1), en función de datos que proporcionan los pulsos usando las ecs. 70 y 63, resultando

$$\frac{d}{da} \left(\frac{1}{M} \right)_A = \frac{e_A (\delta_A + v_A t_r) F_A}{0,8 F_1^2}$$

$$\frac{d}{da} \left(\frac{1}{M} \right)_B = \frac{e_B (\delta_B + v_B t_s \frac{F_B}{\Delta F_B}) F_B}{0,8 F_1^2} \quad (71)$$

$$\frac{d}{da} \left(\frac{1}{M} \right)_C = \frac{e_C (\delta_R + v_C t_s \frac{F_R}{\Delta F_C}) F_C}{0,8 F_1^2}$$

Antes de sustituir estas expresiones en la ecuación general,

$$G_C = \frac{1}{2} F_1^2 \frac{d}{da} \left(\frac{1}{M} \right) \quad (72)$$

conviene recordar lo mencionado en la INTRODUCCION, respecto - a los requisitos que se han de cumplir para su aplicación.

La aplicación de la ec. 72 exige la sustracción de la energía absorbida hasta el instante de autopropagación, E_R . Esta energía a sustraer sería la correspondiente al área rayada de la Fig. 64.

Sustituyendo resulta, para los pulsos del tipo A,B y C,

$$G'_c = 6,25 \cdot 10^{-3} e_A (\delta_A + v_A t_r) F_A \frac{\text{kgm}}{\text{cm}^2}$$

$$G'_c = 6,25 \cdot 10^{-3} e_B (\delta_B + v_B t_s \frac{F_B}{\Delta F_B}) F_B \frac{\text{kgm}}{\text{cm}^2} \quad (73)$$

$$G'_c = 6,25 \cdot 10^{-3} e_C (\delta_R + v_C t_s \frac{F_R}{\Delta F_C}) F_C \frac{\text{kgm}}{\text{cm}^2}$$

Análogamente para pulsos de tipo mixto, como los CA,

$$G'_c = 6,25 \cdot 10^{-3} e_{CA} (\delta_R + v_{CA} t_r) F_{CA} \frac{\text{kgm}}{\text{cm}^2} \quad (74)$$

Ecuaciones a partir de las cuales se aproxima un valor de G_c , denotado G'_c y que difiere de la resiliencia en

$$G'_{c_i} = \mathcal{P}_i - E_{R_i} \quad (75)$$

8.7.- POSIBILIDAD DE ESTIMAR LA TENACIDAD DE ROTURA A PARTIR DE REGISTROS FUERZA-FLECHA. PRIMER CASO: PULSOS DEL TIPO A.

Hasta aquí, y desde el apartado 8.1., se desarrollaron expresiones basadas en datos tomados de pulsos fuerza-tiempo, ahora se plantea el mismo problema a partir de la información que proporcionan los pulsos fuerza-pseudoflecha, registrados directamente u obtenidos por dos integraciones gráficas sucesivas de los pulsos F-t, eliminando de las curvas F-t y δ -t el tiempo, para obtener la curva F- δ .

Reconsiderando la Fig. 64, presentada ahora en la Fig. 65, la rama descendente (F_A, δ_f) del pulso de tipo (A), correspondiente a la autopropagación de la grieta, cumple la condición de existencia de una grieta que se extiende y por lo tanto cabe la consideración de d/da ($1/M$). La ecuación de Irwin da para la fuerza instantánea en el tramo de autopropagación la expresión

$$F_1^2 = \frac{2BG}{d} \frac{1}{\frac{da}{da} M} \quad (76)$$

Siendo B el ancho de la probeta, en nuestro caso de 1 cm. En el supuesto de que dicha ecuación no sea aplicable a un pulso obtenido sin grieta previa, sustituimos la tenacidad de rotura por el parámetro G'_0 , anteriormente citado.

Entonces

$$\int d \left(\frac{1}{M} \right) = 2G'_0 \int \frac{da}{F_1^2} \quad (77)$$

Hemos visto la forma de expresar la fuerza, F_1 , en función de la

longitud de la grieta basada en consideraciones de proporcionalidad directa entre la caída de carga y el porcentaje de fractura inter-cristalina, era

$$F_i = F_A (1 - 1,25 e_A a_i)$$

De donde

$$\frac{\delta_i}{F_i} = \frac{2G'_0}{F_A^2} \int \frac{da}{(1 - 1,25 e_A a)^2}$$

que conduce a

$$\delta_i = \frac{2 G'_0}{1,25 e_A F_A} + C_A F_i \quad (78)$$

Siendo C_A una constante de integración que necesariamente ha de ser negativa, ya que la ec. 78 representa a la recta del pulso en la etapa de autopropagación que es de pendiente negativa, según

$$F_i = - \frac{a}{C_A} \delta_i + \frac{2 G'_0}{1,25 e_A C_A F_A} \quad (79)$$

El valor de G'_0 , será,

$$G'_0 = 0,625 e_A F_A (\delta_i + C_A F_i) \quad (80)$$

En esta ecuación G'_0 y F_A son constantes y la igualdad debe cumplirse para los pares de valores (δ_i, F_i) , correspondientes a la etapa de autopropagación. Se pueden aplicar las dos condiciones extremas de dicha etapa, según las cuales

$$1^a) \text{ Para } F_i = F_A, \quad \delta_i = \delta_A$$

$$2^a) \text{ Para } F_i = 0, \quad \delta_i = \delta_f$$

ambas condiciones conducen en la ec. 80 , a

$$G'_c = 0,625 e_A F_A (\delta_A + C_A F_A) \quad (81)$$

$$G'_c = 0,625 e_A F_A (\delta_f) \quad (82)$$

La ec. 82 ya ofrece una forma sencilla de calcular G'_c , conocidos la fuerza y flecha máximas del pulso.

La ec.81 se usa para conocer el valor de la constante C_A , de forma que podamos posteriormente relacionar la expresión aquí deducida para pulsos del tipo A, con la deducida a partir de datos de pulsos fuerza-tiempo.

Entonces sustituyendo en la ec. 81 , las expresiones de F_i y δ_i en función de (a), resulta

$$G'_c = 0,625 e_A F_A \left[\delta_A + 1,25 e_A v_A t_r a + C_A F_A (1 - 1,25 e_A a) \right] \quad (83)$$

Aplicando las dos condiciones límites, a las ecs.80 y 83 , respectivamente,

$$\begin{aligned} 1^a) \quad F_i &= F_A \\ \delta_i &= \delta_A \end{aligned} \quad G'_c = 0,625 e_A F_A (\delta_A + C_A F_A) \quad (81)$$

$$2a) F_i = 0$$

$$\delta_i = \delta_f \quad G'_c = 0,625 e_A F_A (\delta_A + v_A t_r) \quad (84)$$

de donde $C_A F_A = v_A t_r$ y

$$C_A = \frac{v_A t_r}{F_A} \quad (85)$$

Quedando para la ec. 81

$$G'_c = 0,625 e_A F_A (\delta_A + v_A t_r) \quad (86)$$

que es igual a la 84

$$G'_c = 0,625 e_A F_A \delta_f \quad (87)$$

ya que

$$\delta_f = \delta_A + v_A t_r$$

según se vio anteriormente, las expresiones (84) y (87) son iguales, y están representadas en función de datos de pulsos fuerza-tiempo o fuerza-flecha respectivamente.

Para su aplicación, la ecuación queda

$$G'_c = 6,25 \cdot e_A F_A \delta_f \cdot 10^{-3} \quad \frac{\text{kgm}}{\text{cm}} \quad (88)$$

Expresando:

$$e_A \text{ en cm.}$$

F_A en kg.

δ_f en cm

Análogamente se puede obtener el mismo valor de la constante C_A , eliminando en la ec.79 de la recta, el valor de G'_c , dado por la ec. 84 con lo que la igualdad de las ecs.81 y 84, para llegar al valor de C_A , era correcta, y válida para los dos casos límites.

8.8.- SEGUNDO CASO: PULSOS DEL TIPO B.

Para este tipo de pulsos de nuevo se aplica la ec. 76 , al tramo $F_B F_S$, de autopropagación de la grieta, dado que en la F_S se detiene y progresa con carácter tenaz y aporte externo de energía,

De

$$F_i = F_B (1 - 1,25 e_B a_i)$$

$$d\left(\frac{\delta_i}{F_i}\right) = \frac{2G'_c}{F_i^2} da_i$$

se llega a

$$\delta_i = \frac{2 G'_c}{1,25 e_B F_B} + C_B F_i \quad (89)$$

donde C_B es una constante de integración igualmente de signo negativo

$$F_i = -\frac{1}{C_B} \delta_i + \frac{2 G'_c}{1,25 e_B C_B F_B}$$

De la ec.

$$G'_c = 0,625 e_B F_B (\delta_i + C_B F_i)$$

que para las condiciones límites de autopropagación,

$$1^a) \quad F_i = F_B, \quad \delta_i = \delta_B$$

$$2^a) \quad F_i = F_S, \quad \delta_i = \delta_S$$

resulta,

$$G'_c = 0,625 e_B F_B (\delta_B + C_B F_B) \quad (90)$$

$$G'_c = 0,625 e_B F_B (\delta_S + C_B F_S) \quad (91)$$

la igualdad de estas dos expresiones conduce a

$$C_B = \frac{\delta_S - \delta_B}{F_B - F_S} = \frac{\delta_S - \delta_B}{\Delta F_B} \quad (92)$$

Al sustituir el valor de C_B , en las ecs. 90 ó, 91, da

$$G'_c = 0,625 e_B F_B \left(\frac{\delta_S F_B - \delta_B F_S}{F_B - F_S} \right) \quad (93)$$

El paréntesis de esta expresión se puede escribir

$$\frac{\delta_B (F_B - F_S) + F_B (\delta_S - \delta_B)}{F_B - F_S}$$

o también

$$\delta_B + (\delta_S - \delta_B) \frac{F_B}{\Delta F_B}$$

resultando

$$G'_c = 0,625 e_B F_B \left[\delta_B + (\delta_S - \delta_B) \frac{F_B}{\Delta F_B} \right] \quad (94)$$

que es igual a la expresión 73, ya que

$$(\delta_S - \delta_B) = v_B t_s$$

8.9.- TERCER CASO: PULSOS DEL TIPO C.

Procediendo análogamente, y según la Fig. 65, se tiene

$$F_i = F_R - 1,25 e_C F_C a_i$$

$$\frac{d}{da} \left(\frac{\delta_i}{F_i} \right) = \frac{2 G'_C}{F_i}$$

de donde

$$\delta_i = \frac{2 G'_C}{1,25 e_C F_C} + C_C F_i \quad (95)$$

donde C_C es una constante de integración negativa.

De la ec. 95

$$G'_C = 0,625 e_C F_C (\delta_i + C_C F_i) \quad (96)$$

que para las dos condiciones límites

$$1^a) \quad F_i = F_R, \quad \delta_i = \delta_R$$

$$2^a) \quad F_i = F_S, \quad \delta_i = \delta_S$$

conduce a

$$G'_C = 0,625 e_C F_C (\delta_R + C_C F_C) \quad (97)$$

$$G'_C = 0,625 e_C F_C (\delta_S + C_C F_S) \quad (98)$$

de las que resulta que C_C

$$C_C = \frac{\delta_S - \delta_R}{F_R - F_S} = \frac{\delta_S - \delta_R}{\Delta F_C}$$

que sustituyéndola en las ecs. 97 o 98, dan

$$G'_C = 0,625 e_C F_C \left[\delta_R + (\delta_S - \delta_R) \frac{F_R}{\Delta F_C} \right] \quad (99)$$

igual que la ec. 73, puesto que

$$(\delta_S - \delta_R) = v_C t_s$$

8.10.- ECUACION GENERAL PARA EL CALCULO DE G'_o .

Identificando las fuerzas a las que comienza la autopropagación, y a las que termina, para los tres tipos de pulsos, se puede ver que la ec. 99 es una ecuación general y que las ecuaciones para pulsos de tipo A y B, son casos particulares de ésta.

Así de

$$G'_o = 0,625 e_C F_C \left[\delta_R + (\delta_S - \delta_R) \frac{F_R}{\Delta F_C} \right]$$

para un pulso de tipo A, habría que convertir

$$e_C \text{ en } e_A; \quad F_C \text{ en } F_A; \quad \delta_R \text{ en } \delta_A; \quad \delta_S \text{ en } \delta_f$$

$$F_R = F_C \quad \text{y} \quad \Delta F_C = F_C$$

con lo que resultaría

$$G'_o = 0,625 e_A F_A \delta_f$$

ecuación de los pulsos de tipo A. Lo mismo ocurriría para pulsos de tipo B.

Para pulsos de tipo CA, mixtos,

$$e_C \text{ en } e_{CA}; \quad F_R \text{ en } F_R; \quad \delta_R \text{ en } \delta_R; \quad \delta_S = \delta_f$$

$$F_C \text{ en } F_{CA}; \quad \Delta F_C \text{ en } \Delta F_{CA} = F_R$$

quedando

$$G'_o = 0,625 e_{CA} F_{CA} \delta_f$$

igual a la ec. 74, ya que

$$\delta_f = \delta_R + v_{CA} \cdot t_r$$

8.11.- RESUMEN Y SIGNIFICADO DE LAS EXPRESIONES PARA G'_0 .

Reescribiendo las expresiones (82), (94) y (99)
 ó (73),(A); (73),(B) y (73),(C); en la forma

$$\text{Tipo A: } G'_C = \frac{e_A}{0,8} \left(\frac{1}{2} F_A \cdot \delta_f \right) \quad (82)$$

$$G'_C = \frac{e_A}{0,8} \left(\frac{1}{2} F_A \cdot \delta_A + \frac{1}{2} F_A v_A t_r \right) \quad (73)$$

$$\text{Tipo B: } G'_C = \frac{e_B}{0,8} \left[\frac{1}{2} F_B \cdot \delta_B + \frac{1}{2} F_B \left(\delta_S - \delta_B \right) \frac{F_B}{\Delta F_B} \right] \quad (94)$$

$$G'_C = \frac{e_B}{0,8} \left(\frac{1}{2} F_B \cdot \delta_B + \frac{1}{2} F_B v_B t_s \frac{F_B}{\Delta F_B} \right) \quad (73)$$

$$\text{Tipo C: } G'_C = \frac{e_C}{0,8} \left[\frac{1}{2} F_C \cdot \delta_R + \frac{1}{2} F_C \left(\delta_S - \delta_R \right) \frac{F_R}{\Delta F_C} \right] \quad (99)$$

$$G'_C = \frac{e_C}{0,8} \left(\frac{1}{2} F_C \cdot \delta_R + \frac{1}{2} F_C v_C t_s \frac{F_R}{\Delta F_C} \right) \quad (73)$$

que son equivalentes, se observa que la expresión (82)
 representa el triángulo rayado de la Fig. 66 -(A), (triángu
 lo, $OF_A \delta_f$), análogamente la expresión (94) contiene dos
 términos en su corchete, el primero de los cuales equivale
 al triángulo $OF_B \delta_B$ y el segundo a un triángulo de base
 ($\delta_S - \delta_B$) y con la misma altura (triángulo rayado), multi
 plicado por el producto ($F_B / \Delta F_B$) que es algo mayor que

la unidad.

Ambas expresiones dan valores para G'_C , en los que queda eliminada la energía E_R , equivalente a las áreas $OL_A F_A O$, $OL_B F_B O$, que son cada vez mayores a medida que los pulsos de A a C, corresponden a resiliencias crecientes, lo que está de acuerdo con el hecho de que la resiliencia crece más rápidamente que G_C , a medida que crece el nivel de energía, a lo que se aludió anteriormente con la expresión necesaria

$$G'_C = \rho - E_R; (E_R \equiv A_g)$$

y que ahora ya va implícita en dichas expresiones. (Ver Fig. 64).

La expresión (99) representa, en la misma figura (caso C), las áreas rayadas $OF_C \delta_R O$, estando la doblemente rayada multiplicada por $F_R / \Delta F_C$. En este caso no se ve claramente que quede eliminada el área $OL_C F_C O$, correspondiente a la energía que ha de separar a la G_C de ρ , debido al ensayo de probetas sin grietas preexistentes, lo que hace reconsiderar el planteamiento inicial.

En la deducción de expresiones para G'_C se partía de la relación:

$$\frac{\Delta F_C}{F_C} 100 = \frac{a.e_C}{0,8} 100$$

Sin embargo, la hipótesis de una velocidad de propagación constante, conduce a que la relación que se ha de cumplir, al menos en pulsos del tipo C, es

$$\frac{\Delta F_C}{F_R} 100 = \frac{a e_C}{0,8} 100 \quad (100)$$

que aunque numéricamente da valores similares, es conceptualmente diferente ya que en (100), se expresa que la caída de carga es proporcional al % de área frágil, cuando se considera respecto a la carga a la que comienza la autopropagación F_R , y no respecto a la carga máxima (20).

De la expresión (100), siguiendo los mismos pasos, se deduce para pulsos del tipo O y CA

$$\frac{t_1}{t_s} = \frac{a_1 e_C F_R}{0,8(F_R - F_S)} \quad ; \quad v_g = \frac{a_1}{t_1} = \frac{0,8 \Delta F_C}{t_s e_C F_R}$$

$$t_1 = 1,25 e_C t_s \frac{F_R}{F_R - F_S} a_1 \quad ; \quad F_1 = F_R (1 - 1,25 e_C a_1)$$

$$\left(\frac{1}{M}\right)_C = \frac{\delta_R + 1,25 e_C v_C t_s \frac{F_R}{F_R - F_S} a_1}{F_R (1 - 1,25 e_C a_1)}$$

$$\frac{d}{da} \left(\frac{1}{M}\right)_C = \frac{1,25 e_C \left(\delta_R + v_C t_s \frac{F_R}{F_R - F_S} \right) F_R}{F_R^2 (1 - 1,25 e_C a)^2}$$

y finalmente

$$\text{Tipo C} \quad G'_C = 0,625 e_C F_R \left(\delta_R + v_C t_s \frac{F_R}{F_R - F_S} \right) \quad (101)$$

$$G'_C = 0,625 e_C F_R \left[\delta_R + (\delta_S - \delta_R) \frac{F_R}{F_R - F_S} \right]$$

Tipo CA

$$G'_C = 0,625 e_{CA} F_R (\delta_R + v_{CA} t_r) \quad (102)$$

$$G'_C = 0,625 e_{CA} F_R (\delta_f)$$

que se pueden reescribir

$$\text{Tipo C} \quad G'_C = \frac{e_C}{0,8} \left(\frac{1}{2} F_R \cdot \delta_R + \frac{1}{2} F_R v_C t_s \frac{F_R}{\Delta F_C} \right) \quad (103)$$

$$G'_C = \frac{e_C}{0,8} \left[\frac{1}{2} F_R \cdot \delta_R + \frac{1}{2} F_R (\delta_S - \delta_R) \frac{F_R}{\Delta F_C} \right]$$

Tipo CA

$$G'_C = \frac{e_{CA}}{0,8} \left(\frac{1}{2} F_R \cdot \delta_f \right) \quad (104)$$

$$G'_C = \frac{e_{CA}}{0,8} \left(\frac{1}{2} F_R \cdot \delta_R + \frac{1}{2} F_R v_{CA} t_r \right)$$

que ahora presentan un significado correcto. La expresión (103), en su corchete, contiene dos términos, el primero de los cuales representa el área con rayado horizontal y el segundo el triángulo con rayado inclinado que ha de multiplicarse por un valor $F_R/\Delta F_C$ algo mayor que la unidad. De esta manera tanto para los pulsos de tipo C como los mixtos CA, quedan excluidas las áreas $O'L'_C F_C F_R O'$ y $OL_{CA} F_{CA} F_R O$, por lo tanto el valor de G'_0 que ahora se calcula separa del valor de la resiliencia la energía necesaria para deformar la probeta hasta que aparece una grieta que crece con carácter estable y alcanza una carga de autopropagación; estas áreas, o energías equivalentes, son las sombreadas en los pulsos de la Fig. 66- A, B, C' y CA; quedando para el valor de G'_{01} , áreas de triángulos tal como se deduce del significado de sus expresiones.

8.12.- CALCULO DE LA TENACIDAD DE ROTURA DINAMICA A FLEXION
EN TRES PUNTOS.

Las expresiones finales para G'_o son:

$$\text{Pulsos (A)} \quad G'_o = 6,25 e_A F_A \delta_f \cdot 10^{-3} \text{ kgm/cm}^2 \quad \text{kgm/cm}^2$$

$$G'_o = 6,25 e_A F_A (\delta_A + v_A t_r) 10^{-3} \text{ kgm/cm}^2$$

$$\text{(CA)} \quad G'_o = 6,25 e_{CA} F_R \delta_f \cdot 10^{-3} \text{ kgm/cm}^2$$

$$G'_o = 6,25 e_{CA} F_R (\delta_A + v_{CA} t_r) 10^{-3} \text{ kgm/cm}^2$$

$$\text{(B)} \quad G'_o = 6,25 e_B F_B \left[\delta_B + (\delta_S - \delta_B) \frac{F_R}{F_B} \right] 10^{-3} \text{ "}$$

$$G'_o = 6,25 e_B F_B \left(\delta_B + v_B t_s \frac{F_R}{\Delta F_B} \right) 10^{-3} \text{ kgm/cm}^2$$

$$\text{(C)} \quad G'_o = 6,25 e_C F_R \left[\delta_R + (\delta_S - \delta_R) \frac{F_R}{F_C} \right] 10^{-3} \text{ kgm/cm}^2$$

$$G'_o = 6,25 e_C F_R \left(\delta_R + v_C t_s \frac{F_R}{\Delta F_C} \right) 10^{-3} \text{ kgm/cm}^2$$

(105)

Donde se han de expresar:

e_i en cm; v_i en cm/s

δ_i en cm; t_i en ms

ΔF_i y F_i en kg.

En la DISCUSION de este trabajo se presentan dos tablas en las que se aplican estas expresiones al cálculo de G'_C , pero corregidas según las consideraciones que allí se hacen y para pulsos del tipo A_1 y A_2 con los correspondientes valores de la resiliencia y valores de G'_C , calculados según la expresión dada por Bueckner (Columnas $G_C(2)$).

Para los pulsos del tipo A_1 , se toma $e_A = 1$, dado que sus fracturas presentan prácticamente un 100 % de aspecto frágil, mientras que para los pulsos del tipo A_2 , que son morfológicamente iguales a los del tipo A_1 , se introducen los valores de e_A planimetrados de fotomacrografías de las fracturas correspondientes.

TIPOS DE PULSOS OBSERVADOS

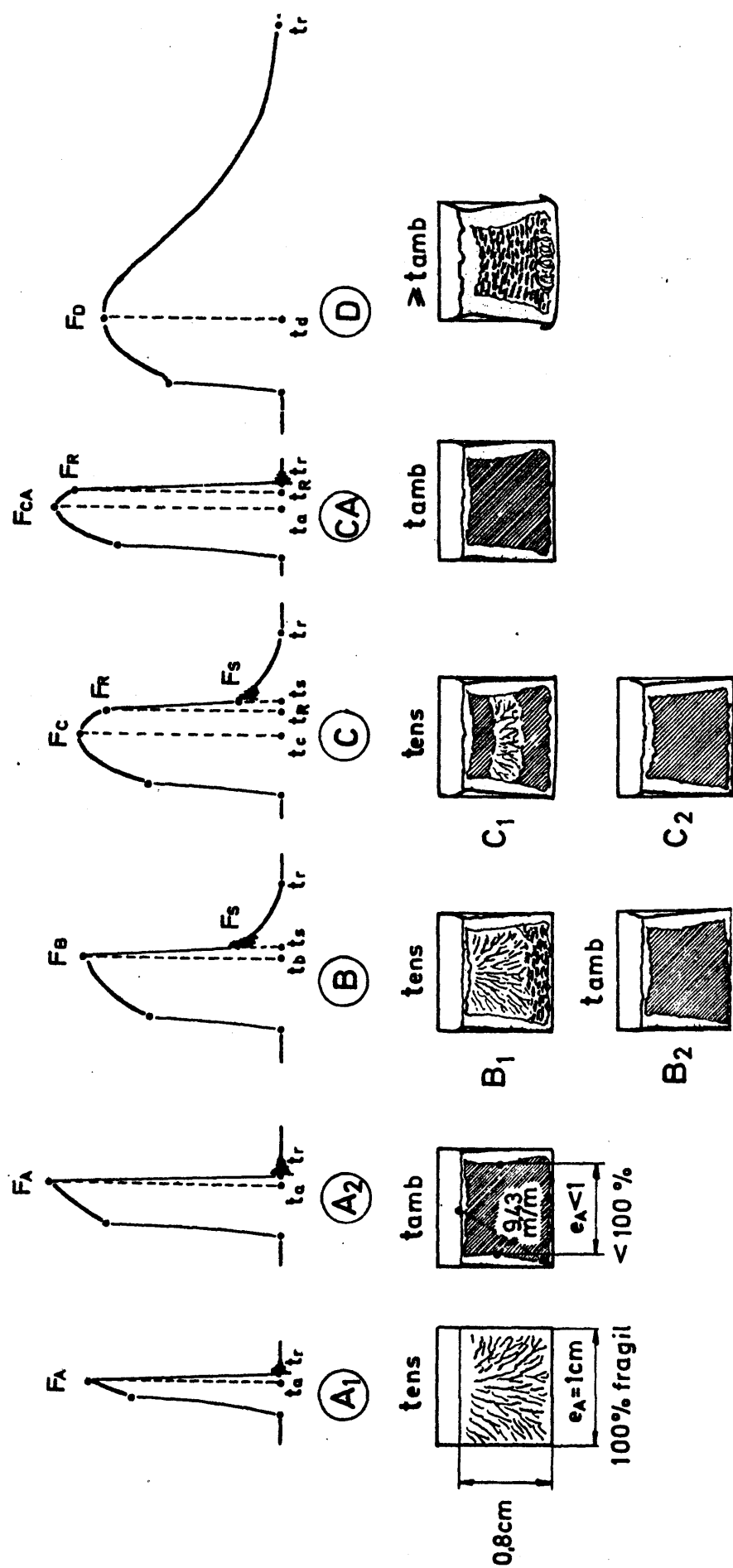


Fig. 60.- Correlación del tipo de pulsos registrados con el aspecto de las fracturas correspondientes. El significado que se les atribuye a las fuerzas, F_i , y a los tiempos t_i , se indica en los dibujos esquematizados de los pulsos.

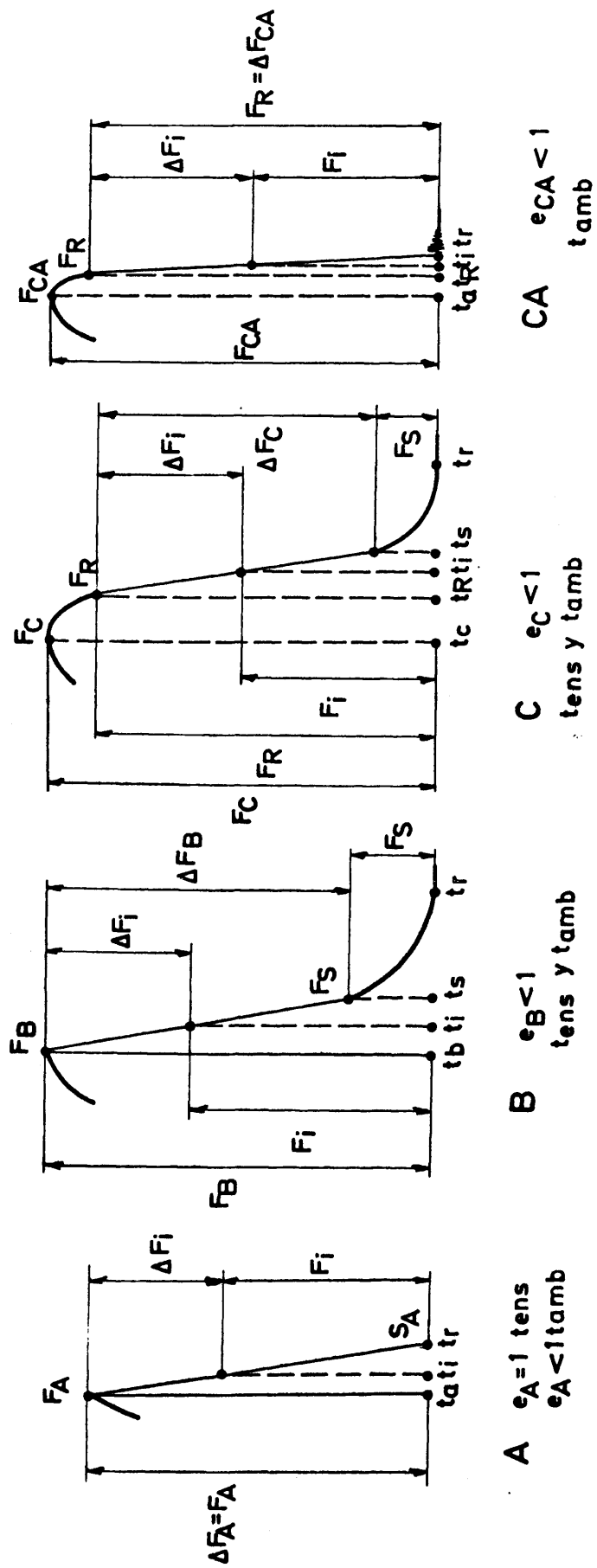


Fig.61 Asignación de símbolos a cada punto particular de los pulsos, admitiendo en la etapa de propagación de la grieta, caídas de la fuerza lineales.

$$(v_0)_{\max} = 5.44 \text{ m/s}$$

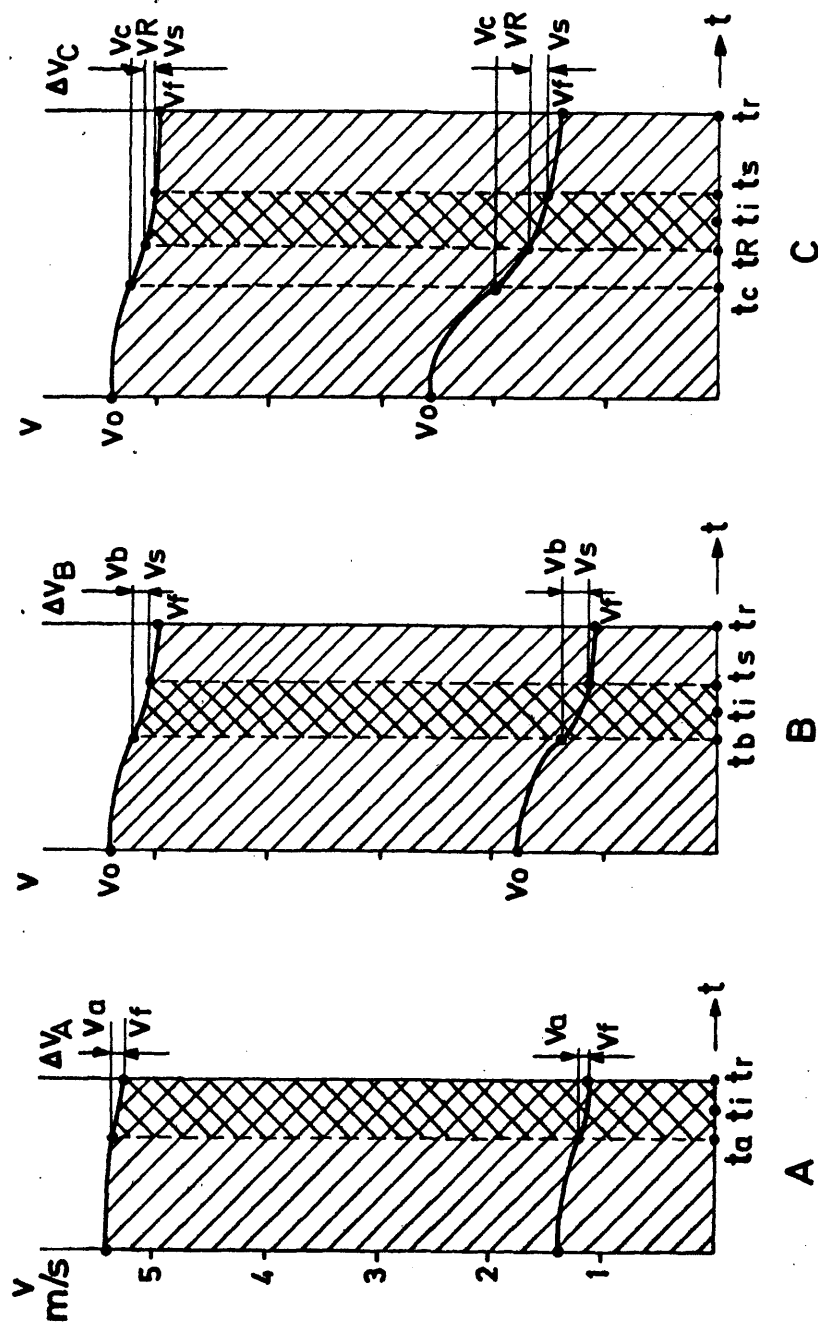


Fig. 62 Curvas de la velocidad del martillo, durante el intervalo de rotura, para casos extremos de cargas aplicadas máximas y mínimas, respectivamente. Nomenclatura de los puntos particulares.

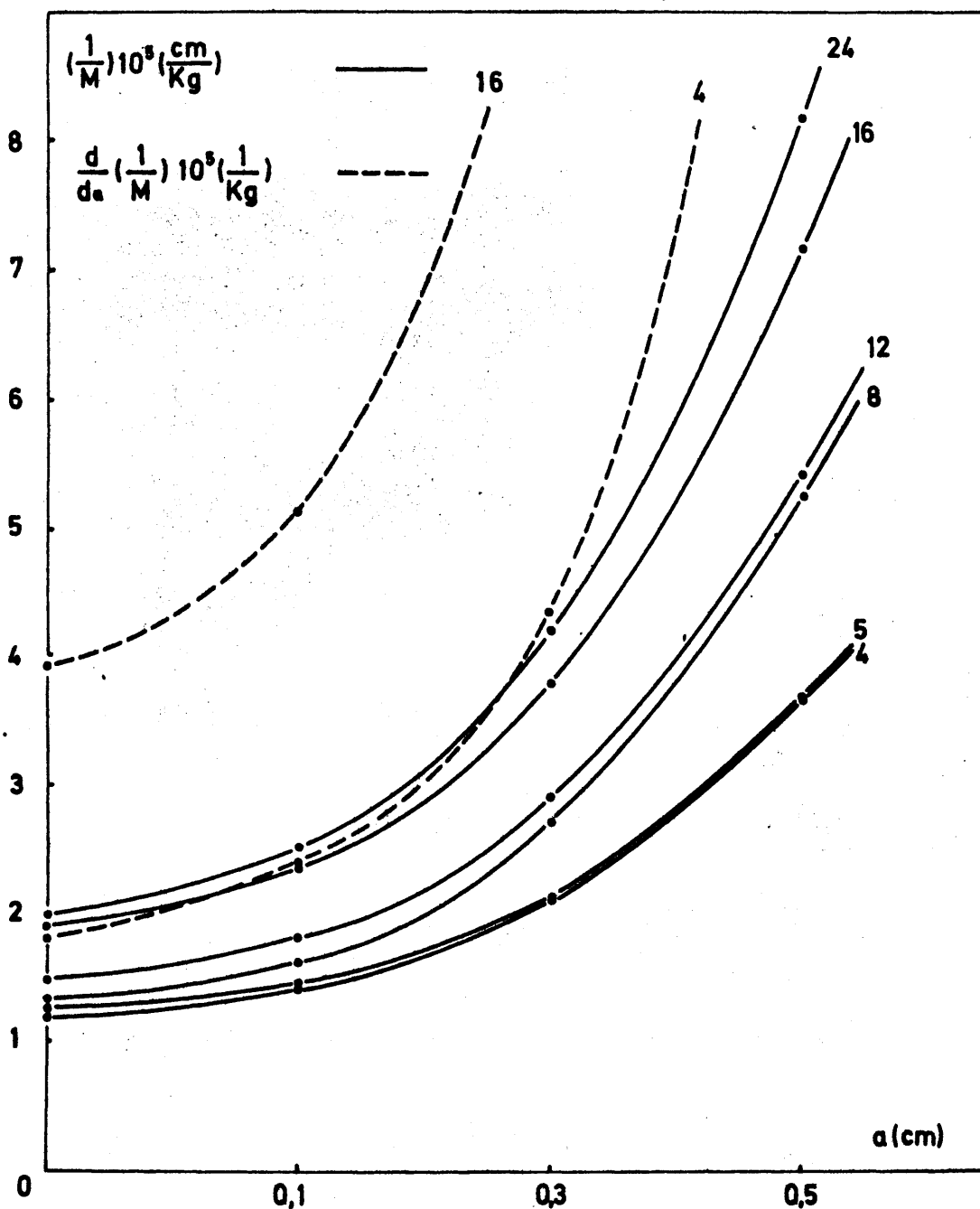


Fig. 63 Curvas experimentales de la acomodación en función de la longitud de la grieta, (líneas continuas), y de las pendientes de dichas curvas en función de la longitud de la grieta, (líneas de trazos).

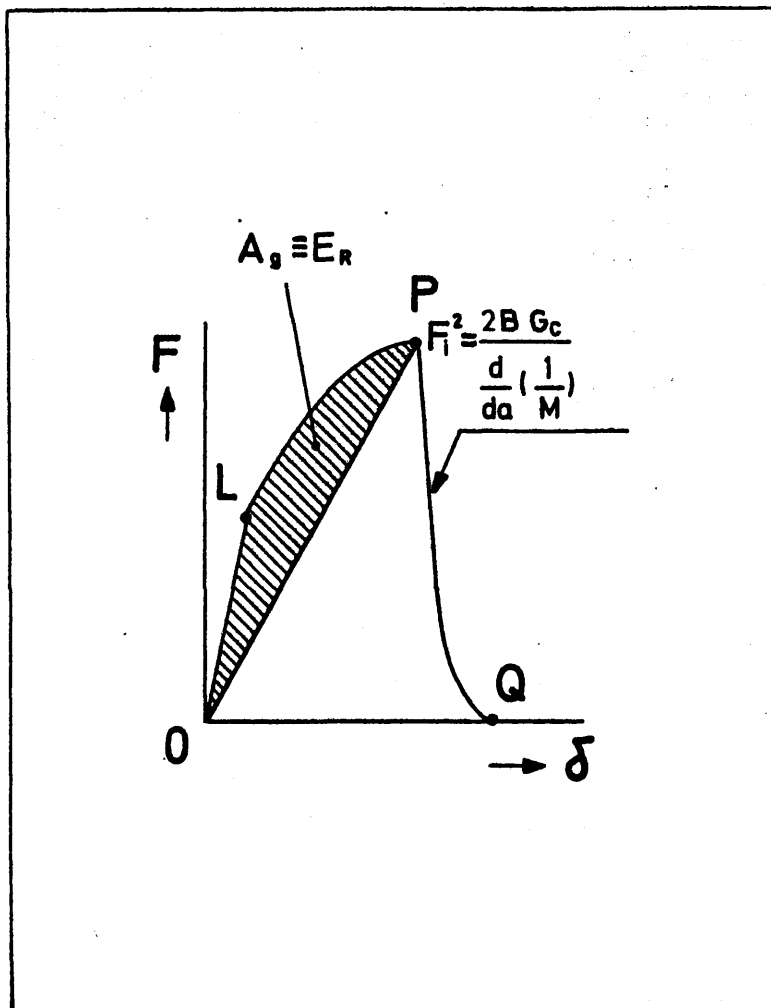


Fig. 64 Dibujo esquemático de un registro fuerza-flecha. El área rayada equivale a la energía de creación de una grieta crítica. Expresión que indica la caída de la carga en el tramo de propagación.

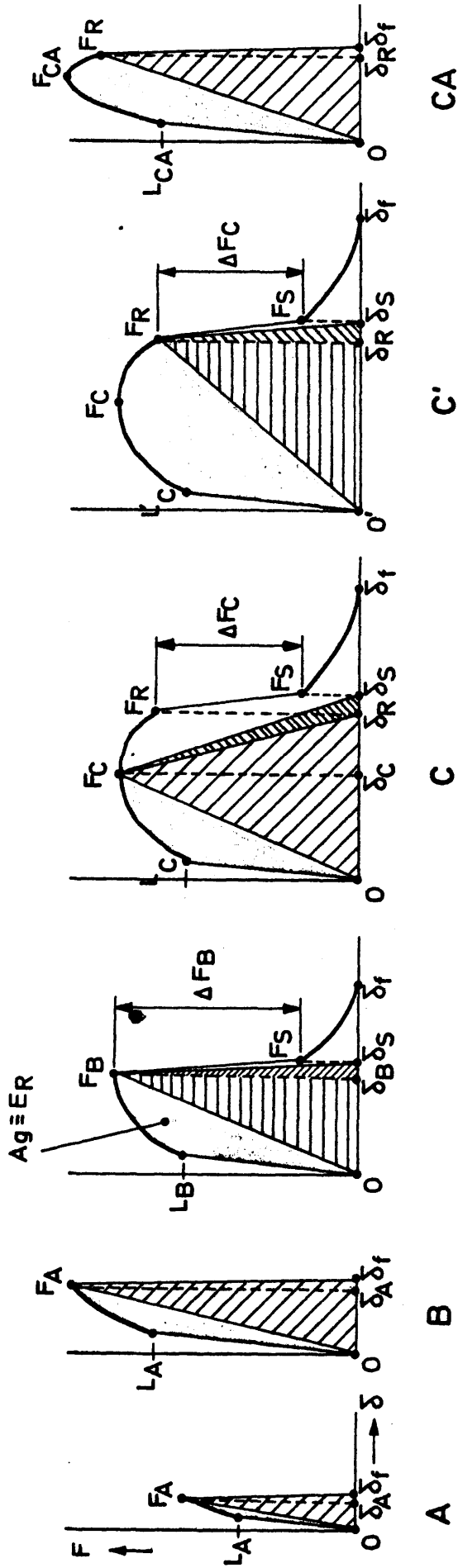


Fig. 66 Interpretación y significado de las expresiones desarrolladas para G_c' en los diversos tipos de pulsos. Las áreas sombreadas corresponden a la energía absorbida durante la creación y extensión de la grieta a un tamaño crítico de, auto-propagación. Los triángulos rayados representan la energía estimada por G_c .

DISCUSION

La tensión de alimentación al puente de Wheatstone es una variable que permite regular perfectamente el tamaño del pulso que se desea registrar en la pantalla del oscilógrafo, de forma que es posible elegir un tamaño adecuado para las posteriores operaciones de toma de datos. Este procedimiento permite prescindir del empleo de amplificadores intermedios que ofrecían dificultades en la obtención de pulsos limpios aún siendo amplificador y oscilógrafo de la misma procedencia. La regulación del tamaño del pulso mediante un amplificador intermedio o variación de la tensión de alimentación al puente llevan consigo la modificación del valor de la constante de calibrado que resultaría dividida por el factor de amplificación y conocida por lo tanto en el empleo de un amplificador intermedio, pero no cuando la amplificación se efectúa mediante la variación de la citada tensión de alimentación. Se presentó el problema de conocer la variación de dicha constante con el voltaje dentro del campo de los voltajes de trabajo. Se ha encontrado que la constante de calibrado es proporcional a la inversa de la tensión de alimentación, de manera que basta efectuar dos determinaciones de la constante a valores extremos de voltaje tales como los empleados de 14 y 25 voltios, para conocerla en todo el campo de trabajo. Los errores que resultaron para el cálculo de dicha constante fueron inferiores al 1,5%. Este procedimiento de trabajo permite una instrumentación de excelente flexibilidad que garantiza pulsos de muy buena calidad, con un puente de Wheatstone, su fuente de alimentación, un oscilógrafo y un dispositivo electromecánico de disparo.

Una vez efectuado el calibrado previo, el valor de la constante se puede contrastar con un valor de la misma que se obtiene calculándola, por una expresión que se demuestra y que requiere un tratamiento estadístico que utiliza datos de pulsos correspondientes a roturas que han tenido lugar a la misma velocidad media del martillo. La reunión de una población de estos datos necesaria para un análisis de confianza sólo es posible cuando se practican series de numerosas roturas, por lo que no es posible prescindir de un calibrado cuasiestático previo, si bien puede constituir un procedimiento de control.

El empleo de un circuito de señalización tan simple como el que se describe, permite obtener información acerca de las particularidades que presentan los pulsos. No existe la garantía de que el finísimo hilo empleado, aunque bien cementado a la probeta para restringir al máximo su deformación, no experimente como es lógico cierto alargamiento antes de su rotura, lo que obliga a tomar sus indicaciones con carácter cualitativo. La señalización en un pulso, del instante en que aparece la grieta se refiere al instante en el que alcanza la superficie del fondo de la entalla, los extremos de la misma o cuando la grieta en una cara lateral alcanza la cara de la probeta opuesta a la de la entalla.

Una probeta que no rompa y pase a través de los apoyos del péndulo impulsada por el martillo, se flexiona en un ángulo tal, que su longitud de 55 mm. forma un triángulo cuya base son los 40 mm. que separan a los apoyos. En este caso extremo se puede ver geométricamente que el máximo recorrido durante el

cual el martillo ejerce fuerza sobre la probeta es de 31,4 mm. En realidad esta flecha correspondería a una probeta de enorme tenacidad y lo frecuente, en roturas de hasta unos 4 kgm/cm², es que el martillo ejerce fuerza sobre la probeta durante un recorrido del orden de 1 mm.

La expresión (14), que estima el deslizamiento de la probeta sobre los apoyos, permite conocer la longitud de este deslizamiento, pero aún adoptando un coeficiente de fricción seca entre la probeta y los apoyos, que conjuntamente con el conocimiento de la fuerza entre ellos, permitiría un cálculo aproximado de la energía absorbida en esta fricción, quedaría el problema de que en tal fricción se producen deformaciones en la superficie de la probeta bajo sistemas de tensión complejos y variables. En probetas de baja resiliencia este tipo de pérdidas se puede despreciar.

La función que relaciona el ángulo de giro de la probeta con el recorrido del martillo presenta un punto de inflexión para un recorrido de 5 mm. y prácticamente para roturas frágiles se puede admitir que dicho giro es proporcional al recorrido del martillo.

Las funciones que se deducen aplicando sencillas consideraciones dinámico-energéticas al choque, se confirman experimentalmente con buen acuerdo, teniendo en cuenta que las dispersiones que se puedan presentar se derivan de la propia norma del ensayo, que considera la pérdida de la energía potencial del martillo con una energía íntegramente absorbida por la pro-

beta lo que evidentemente no es cierto. Estas expresiones relacionan datos de los pulsos tales como áreas, fuerzas y velocidades medias, etc., con datos que proporciona la máquina Charpy como energías aplicada, absorbida, final, velocidades iniciales y finales, etc., y otros datos como la constante de calibrado.

Una expresión de interés, por la repercusión que puede tener en la toma de datos de los pulsos, es la que predice una variación del área bajo los pulsos en función de la energía aplicada. Generalmente es una práctica, frecuente en el ensayo, aplicar una carga que exceda en unos dos Kgm. a la que se presume va a absorber la probeta. Ocurre, sin embargo, que en series de probetas con el mismo estado metalúrgico y que por lo tanto poseen aproximadamente la misma resiliencia, a medida que se rompen con cargas crecientes también crece la resiliencia hasta que el exceso de carga es de unos 4 kgm., en cuyo caso la resiliencia es independiente de la carga aplicada, tal es el caso de probetas de hasta unos $0,5 \text{ kgm/cm}^2$. Lo mismo ocurre respecto al área bajo los pulsos, que para roturas de la misma resiliencia, esta área aumenta a medida que la carga aplicada se aproxima a la que absorbe la probeta. Para probetas que absorben unos 4 kgm/cm^2 las áreas bajo los pulsos registrados no son independientes de la energía aplicada, hasta que ésta no se aplica con un exceso de unos 6 kgm. sobre la energía de rotura. Para probetas de unos 8 kgm/cm^2 , es preciso aplicar cargas de unos 20 kgm. o superiores y para probetas con una mayor absorción de energía no se consigue que el área bajo los pulsos sea independiente de la energía aplicada, al menos en nuestro equipo de 30 kgm.

En cuanto al estudio de las roturas frágiles, esto no presenta inconveniente, dado que basta examinar roturas con absorciones de hasta unos 4 kgm/cm^2 de resiliencia.

Cuando se aplica una carga próxima a la que la probeta va a absorber, el martillo alcanza a la probeta a una velocidad más baja que si se hubiera aplicado una energía más alta. Por otra parte ocurre que si la carga es muy próxima a la energía absorbida en la rotura, la energía final que conserva el martillo después de la misma es prácticamente nula y también su velocidad. En este caso la probeta se rompe a una velocidad media, que especialmente en la etapa de rotura es muy lenta (probeta no fragilizada) y semejante a la de un ensayo cuasies tático, mientras que la aplicación de cargas con un exceso notable de energía, la velocidad final del martillo es análoga y del mismo orden que la velocidad inicial. A partir de esta con dición es cuando el ensayo se puede considerar dinámico y entonces dentro del margen de velocidades del ensayo, la energía aplicada deja de afectar tanto al valor de la resiliencia como al área bajo los pulsos. Este último aspecto se debe precisamen te como se ve en la Fig. 44, al acortamiento de la abscisa del pulso, o sea, del tiempo que dura la rotura y que viene impues to por la velocidad inicial y final o velocidad media en el choque o exceso de carga aplicada. En probetas de baja resilien cia este efecto apenas se pone de manifiesto, como es lógico, pero en probetas que absorben energía en la etapa de propaga ción de la grieta se aprecia ya tal influencia, por ejemplo a unos 4 kgm/cm^2 . En contraposición a este aumento de área con la disminución del exceso de energía aplicada, está el hecho de

que para energías aplicadas muy próximas a las que se absorben, pero esta pequeña disminución de la ordenada de un pulso debida a un más lento movimiento del martillo es un efecto que influye en el área bajo el pulso, en menor proporción que el tiempo de rotura.

En el capítulo VI, se presentan las relaciones que existen entre los datos que proporcionan los pulsos. El desdoblamiento de áreas se identifica con las disminuciones parciales de pérdida de la cantidad de movimiento del martillo, lo que se confirma experimentalmente con buen acuerdo.

En (18), se publicó una expresión para el cálculo de la energía que absorbe una probeta, cuando se conoce la energía aplicada y se ha medido el área bajo el pulso. Esta expresión se toma en consideración en numerosos trabajos, y su deducción se da independientemente en éste, antes de que nos fuera comunicada por B. Augland, a la que se llega por caminos diferentes. En (20), se da otra deducción para la misma expresión. Estas ecuaciones exigen el empleo de otra ecuación previa para el cálculo de una energía que luego se corrige mediante la citada expresión. Este enfoque del problema quizás dependa del hecho de que el empleo de péndulos de gran energía, permiten romper probetas a velocidades iniciales más grandes y por consiguiente con una variación de velocidad del martillo en el choque pequeña, por lo que una expresión calcula la energía absorbida por la probeta, con la hipótesis de que la velocidad del martillo es constante durante el choque e igual a la velocidad inicial, y este dato se introduce en la primera ecuación cita

da que corrige esta energía y da la energía realmente absorbida por la probeta. Si se toma en consideración una velocidad media durante el choque en la deducción de esta expresión, se obtiene una ecuación única que permite el cálculo directo de la energía absorbida por la probeta en función de los dos mismos datos, tal es el caso de la ec. 55, que se presenta, y cuya confirmación experimental se incluye en la Fig. 58. Los factores numéricos que aparecen en la expresión dependen de la masa del martillo y de la constante de calibrado.

Puede ocurrir que cuando un trozo de probeta se agarrata momentáneamente frenando la velocidad del martillo, la máquina Charpy indique una energía absorbida que es superior a la absorbida normalmente por una rotura sin tal frenado y que no aparece reflejada en el pulso, ya que esta absorción de energía no es registrada por los extensímetros eléctricos. En este caso la energía absorbida, calculada a partir del área bajo el pulso, es menor que la que indica la máquina, que se puede expresar en función de la pérdida de velocidad del martillo. El cociente de ambas energías será inferior a la unidad y será un porcentaje que multiplicado por la energía indicada por la máquina, dará la energía absorbida por la probeta o la que se calcula a partir del área bajo el pulso. Esta expresión da la oportunidad de controlar posibles pérdidas de energía, en el caso de que éstas no sean detectables por los extensímetros eléctricos.

Todas las consideraciones y análisis precedentes tienen por objeto garantizar el mejor conocimiento del ensayo de

choque instrumentado que se está haciendo imprescindible en el estudio de las cualidades de rotura de los materiales, con la finalidad de desarrollar expresiones para el cálculo de la fuerza de extensión de grietas, G_c , y a la que también nos referimos con la expresión, "tenacidad de rotura", como genéricamente es usual. El desarrollo de expresiones para el cálculo de la tenacidad de rotura se apoya en dos hipótesis básicas. La primera consiste en que el cociente entre la caída de la carga (en la etapa del pulso de autopropagación de la grieta) y la carga máxima alcanzada en dicho pulso, expresado como un porcentaje, es directamente proporcional al porcentaje de fractura frágil planimetrada de fotomacrografías de las fracturas correspondientes. Este hecho que se examinó en un trabajo anterior (16), se presentó recientemente con una relación bien probada (20), aunque la dispersión de valores, da pie para pensar que esta relación es válida en muchos casos, pero que hay otros, en los que dicha relación podría ser otra muy parecida, pero conceptualmente diferente. En pulsos en los que la autopropagación de la grieta comienza después de rebasada la máxima fuerza y a una inferior a ella, parece que la relación correcta sería considerar la caída de la carga a partir de esta fuerza de autopropagación respecto al valor de la misma y no al de la fuerza máxima. Esta proporcionalidad directa permite expresar fuerzas y flechas instantáneas en función de la longitud de la grieta dado que el porcentaje de fractura frágil, se descompone en fracturas prácticamente planas, en dos factores que son un ancho constante de la probeta (1 cm.) por la profundidad de la grieta. Esto parece en aparente contradicción, con los modelos idealizados de ampliación de grietas

tas de las ecs. 16-1,2,3, en las que el frente de la grieta se considera parabólico o aproximadamente como el arco de una circunferencia. En la bibliografía, la superficie de ampliación de la grieta se considera desdoblada en un ancho constante y una profundidad de grieta variable con la rotura, especialmente en probetas de sección cuadrada. La descomposición del área en función de la longitud de la grieta en una forma no simple conduciría a una gran complejidad y estaría por otra parte a su vez en contradicción con las observaciones experimentales, dado que en roturas efectuadas en plena zona de transición (16), los porcentajes de áreas intercristalinas son de aspecto rectangular y con lados paralelos a la entalla aunque no se extienden a todo lo ancho de la probeta por los labios cortantes que aparecen, Fig. 10, ($e_{A,B,C}$).

El segundo punto de vista básico en el que se apoya la deducción de expresiones para la tenacidad de rotura, surge del examen del aspecto de los pulsos en su rama de autopropagación. Los pulsos en esta parte presentan una caída brusca de aspecto lineal. Se ha visto que con una base de tiempos de 50 microsegundos por centímetro no se puede distinguir una curvatura apreciable en probetas que rompen hasta con cuatro kgm/cm^2 y dan porcentajes de fractura frágil del 90%. La hipótesis de una caída de la carga lineal se admite en este trabajo, en principio. Por otra parte puesto que la toma de datos se hace en los pulsos obtenidos con probetas Mesnager, sin grietas previas generadas y aunque en estas expresiones para la tenacidad de rotura va implícitamente sustraída la energía absorbida hasta el instante de la autopropagación, no hay ga-

rantías de que las cargas instantáneas varíen desde y a través de la rama de rotura del pulso, de la misma forma, tanto si es obtenido a partir de probetas con o sin grieta previa.

De los dos puntos de vista básicos que se adoptan se deduce que la velocidad de propagación de la grieta es una constante característica de cada rotura, es decir, de cada estado metalúrgico, (sin entrar en consideraciones a microescala, que conducirían a velocidades de propagación escalonadas, según las diferentes orientaciones de los granos, de sus bordes y otras fases, etc.). En (1) se menciona que la velocidad de propagación de una grieta tiende rápidamente hacia un valor constante. Poco antes de alcanzarse la carga máxima en un pulso, tiene lugar la nucleación de una grieta que crece con relativa lentitud y con carácter estable, siendo el crecimiento tanto más lento cuanto menos frágil sea el material, pero cuando la grieta alcanza un tamaño crítico se autopropaga a gran velocidad y esta velocidad tiende rápidamente a un valor límite que es una fracción de la velocidad del sonido en el sólido.

El conocimiento de las fuerzas y de las flechas instantáneas en función de la longitud de la grieta (ecs. 63 y 67) permiten hallar funciones analíticas sencillas para la acomodación y su derivada respecto a la longitud de la grieta, cuyas representaciones gráficas en función de la longitud de la misma conducen a las curvas típicas (Fig. 63). Estas expresiones pueden entonces introducirse en la ecuación que define a la tenacidad de rotura, G_0 , ec. 72, pero respetando las con

diciones que mantienen la validez de dicha ecuación. La primera condición exige la existencia de una grieta (a), que se extiende a una longitud ($a+da$) en condiciones de amarre o fijación de la probeta, de forma que no absorba trabajo externo durante la propagación de la grieta, y la energía consumida en esta autopropagación se suministra a expensas de la energía de deformación elástica acumulada en la zona del vértice de la grieta. Para la generación de estas grietas se suele partir de probetas con una entalla de gran acuidad que permite obtener la grieta en varios miles de ciclos de fatiga, antes de someter a ensayo la probeta. Ocurre por otra parte, que se intenta usar el ensayo Charpy, instrumentado convenientemente, como una técnica útil para la medida de G_c , aunque se conocen de antemano las dificultades que esto entraña, ya que normalmente las medidas de G_c exigen varias técnicas y equipos que han de trabajar coordinadamente. En (10), se mencionan técnicas instrumentadas, equipos de medición de longitudes de grieta y equipos de fatiga para la generación de grietas previas. Si se pretende estimar el G_c de un material con probetas Mesnager en una máquina convencional, se da una absorción previa de energía en la nucleación y crecimiento de la grieta estable ya mencionada, a partir de la cual sobreviene la autopropagación, sólo a partir de la existencia de una grieta se puede aplicar la ecuación 72. Para que la resiliencia pueda aproximarse al valor de la tenacidad de rotura (10) sería necesario restar una energía (E_R), empleada en crear y aumentar la longitud de la grieta estable, hasta el instante de autopropagación, lo que se representa por el área rayada en la Fig. 64. Las expresiones 73 llevan implícitamente efectuada esta

sustracción por lo que en este sentido son cifras inferiores a las de la resiliencia y por lo tanto más aproximadas al verdadero valor de la tenacidad de rotura, que a diferencia de la resiliencia, se considera como una propiedad característica de un estado metalúrgico, en relación con la rotura.

Análogamente introduciendo una condición de caída de fuerza en el pulso proporcional a la longitud de la grieta, en la etapa de autopropagación y suponiendo que esta rama del pulso obedece a la ecuación general de Irwin, de nuevo se llega a una relación: fuerza-flecha lineal en la etapa de rotura, pero ahora para pulsos fuerza flecha a diferencia de los fuerza-tiempo, que eran sobre los que hasta ahora veníamos discutiendo. Esta linealidad permite desarrollar expresiones sencillas para una pseudo-tenacidad de rotura que denotamos G'_0 . La interpretación y significado de estas ecuaciones sobre los pulsos fuerza-flecha se da en apartado 8,11.- y se llega a la conclusión de que, para pulsos en los que la autopropagación comienza después de rebasada la carga máxima y a una fuerza inferior a ésta, la proporcionalidad válida no sería el porcentaje de caída brusca de la carga respecto a la carga máxima, sino respecto a la carga de autopropagación. La aplicación de las ecuaciones que para el cálculo de G'_0 se incluyen en el apartado 8.12.- conducen, usando los datos proporcionados por la máquina instrumentada, a valores que nos parecen altos aunque siempre inferiores a los de la resiliencia.

Es bien conocido que las resiliencias Charpy en "V" son cifras menores que las obtenidas con probetas entalladas en "U" (Véase apéndice Figs. D y E). Cabe pensar que identif

cando a G'_0 con áreas parciales de pulsos fuerza-flecha, se obtengan valores diferentes si los datos proceden de probetas en talladas en "V" o en "U" pero esto se prevee que no será así, dado que el valor de E_R a sustraer (área rayada de la Fig. 64), sería menor para probetas en "V" que en "U" y esta misma idea conduce al hecho de que en probetas en las que se ha generado una grieta previa, esta energía E_R , a sustraer, sería nula, obteniéndose un valor correcto de la tenacidad de rotura por lo que respecta a la creciente acuidad de la entalla.

De las correlaciones presentadas entre la resiliencia y tenacidad de rotura, se ve que por ésta y otras razones, los valores de G_c , son prácticamente iguales que los de la resiliencia en probetas por ejemplo de hasta unos $0,4 \text{ Kgm/cm}^2$, dado que rompen en las proximidades de su límite elástico, mientras que para energías absorbidas crecientes los valores de la resiliencia se separan cada vez más por exceso del valor de la tenacidad de rotura, Fig. 67.

Los valores deducidos para G'_c poseen ya de por sí una visión más real de las propiedades de rotura que las que ofrece la resiliencia pero es preciso observar con más precisión las condiciones que se han de cumplir en el cálculo de G_c .

En (21), se afirma que para la aplicación de la ecuación 72, lo correcto es prescindir de los pequeños movimientos de los amarres o piezas de la máquina de ensayo que sujetan a la probeta, ya que la autopropagación se efectúa

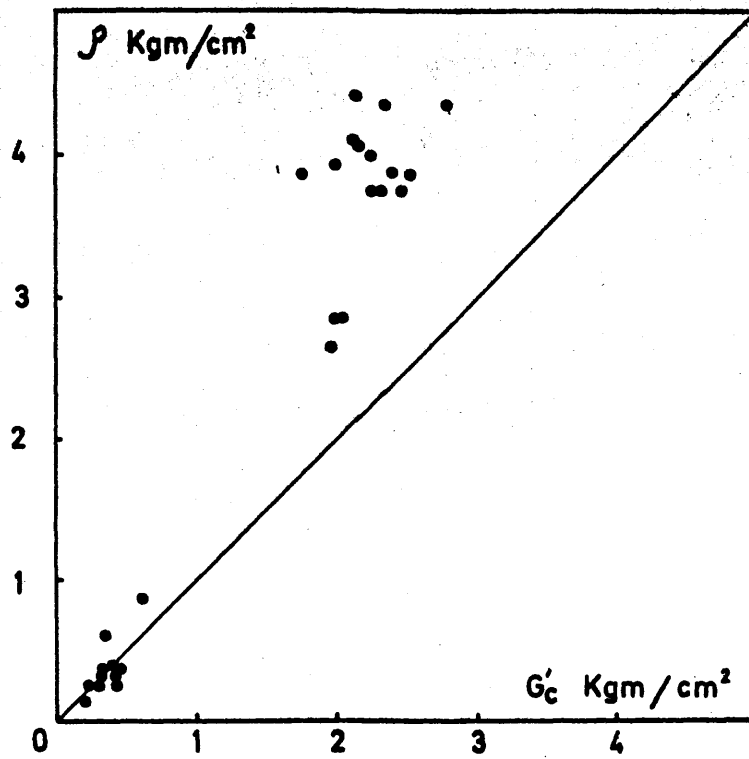


Fig. 67

exclusivamente a expensas de la energía que relaja la zona deformada en las inmediaciones del vértice de la grieta. La energía que pueden relajar los amarres o piezas de sujeción de la probeta, no afecta a la relajación de la energía, que se emplea en el trabajo inelástico asociado al crecimiento de la grieta y que procede de la zona del vértice de la misma, sino que origina una deformación elástica global de la probeta que contribuye a la acumulación de una energía elástica recuperable.

Tanto si la rotura tiene lugar en condiciones de amarre fijas, como si no, la forma correcta de calcular la tenacidad de rotura es la de considerar la carga de autopropagación, independientemente de considerar la inmovilidad de los amarres de la máquina de ensayo.

Finalmente la pseudotenacidad de rotura G'_C , precisa según lo que se acaba de mencionar la sustitución de la flecha final por la flecha que corresponde a la carga de autopropagación y por lo tanto las ecuaciones del apartado 8.12.-, deben expresarse sin el término de trabajo que corresponde al ligero movimiento del martillo, durante la autopropagación de la grieta, de tal forma que las expresiones que se proponen para la estimación de la tenacidad de rotura son:

$$\begin{aligned}
 G'_C &= 1/2.(e_A/0,8).F_A. \delta_A.10^{-3} && \text{kgm/cm}^2 \\
 G'_C &= 1/2.(e_B/0,8).F_B. \delta_B.10^{-3} && " \quad " \\
 G'_C &= 1/2.(e_C/0,8).F_C. \delta_C.10^{-3} && " \quad " \\
 G'_C &= 1/2.(e_{CA}/0,8).F_{CA}. \delta_{CA}.10^{-3} && " \quad "
 \end{aligned}
 \tag{106}$$

TABLA I. PULSOS TIPO A₁. ($e_A = 1$). $G'_C = 6,25 \cdot e_A \cdot F_A \cdot \delta_A \cdot 10^{-3} \text{ Kgm/cm}^2$ (1)

Desig.	F_A Kg. 10^{-3}	δ_A cm. 10^2	$G'_C(1)$ Kgm/cm ²	ρ Kgm/cm ²	$G'_C(1)$ ρ Valores medios	$G_C(2)$
4	2,08	2,54	0,33	0,38	0,37	0,41
4'	1,87	3,80	0,44	0,31	0,40	
5	2,14	2,62	0,35	0,63		
7	1,47	2,29	0,21	0,15	0,23	0,26
8	1,72	2,23	0,24	0,25		
10	1,66	3,28	0,34	0,25	0,40	0,40
11	2,06	3,57	0,46	0,38		
12	2,06	3,10	0,40	0,38	0,33	0,32
13	1,91	2,60	0,31	0,31		
14	1,66	3,42	0,35	0,31	0,45	0,35
16	1,87	3,58	0,45	0,25	0,61	0,49
24	2,21	4,41	0,61	0,88		

$G'_C(1)(\text{medio}) = 0,4 \text{ Kgm/cm}^2$. $G_C(2)(\text{medio}) = 0,37 \text{ Kgm/cm}^2$. $\rho (\text{media}) = 0,4 \text{ Kgm/cm}^2$

Acero F-144 templado.

TABLA I. PULSOS TIPO A₂. ($e_A \approx 0,865$). $G'_C = 6,25 e_A^F \delta_A \cdot 10^{-3} \text{ Kgm/cm}^2$ (1)

Desig.	F_A $\text{Kg} \cdot 10^{-3}$	δ_A $\text{cm} \cdot 10^2$	e_A cm.	$G'_C(1)$ Kgm/cm^2	ρ Kgm/cm^2	$G'_C(1)$ ρ Valores medios	$G_C(2)$
M-1	3,86	9,7	0,86	2,03	2,88	2,0	1,56
M-2	3,82	9,8	0,86	2,02	2,88		
M-3	4,07	8,9	0,87	1,98	2,68	2,8	
M-5	4,03	9,9	0,86	2,15	4,43		
M-6	4,11	9,6	0,87	2,16	4,06	2,1	1,75
M-7	3,98	9,5	0,86	2,00	3,94		
M-8	4,03	9,8	0,87	2,14	4,12	2,1	1,67
M-10	4,23	9,8	0,87	2,25	4,00		
M-11	4,52	9,8	0,86	2,35	4,25	2,1	1,97
M-12	4,52	7,3	0,86	1,76	3,88	4,0	
M-13	4,60	9,6	0,87	2,40	3,88		
M-14	4,35	10,0	0,87	2,31	3,75	2,3	2,06
M-15	4,52	9,5	0,86	2,27	3,75	3,8	
M-16	4,48	11,5	0,87	2,78	4,37		
M-17	4,11	11,5	0,87	2,52	3,88	2,7	2,11
M-18	4,20	11,1	0,86	2,48	3,75	4,0	

$G'_C(1)$ (medio) = 2,2 Kgm/cm² . $G_C(2)$ (medio) = 1,85 Kgm/cm² . ρ (medio) = 3,80 Kgm/cm²

Acero F-144, templado y revenido a 420°C.

El término que se suprime en las citadas ecuaciones del apartado 8.12.-, se identifica conjuntamente con la energía acumulada en los apoyos, como las responsables de la brusca despedida de los trozos de la probeta frágil en las roturas y que, en la pág. 97, se estimó para un caso particular en 0,33 kgm. y que puede ser del orden de hasta algo más de 1 kgm. según el nivel de resistencia o la magnitud de la fuerza máxima alcanzada en el pulso. En este sentido los valores calculados de G'_0 , según las ecuaciones 106, incluidos en la página siguiente, presentan valores en buena concordancia, con los que se calculan a partir de una expresión propuesta por Bueckner (9), reputada como válida y que calcula la tenacidad de rotura a partir del conocimiento de la fuerza instantánea de autopropagación en el pulso y del conocimiento de la geometría de la entalla a efectos de valorar la influencia concentradora de tensiones.

Se han efectuado comprobaciones en el sentido de que la energía absorbida por la probeta en una rotura ha de ser igual a la de creación y extensión de la grieta estable (E_R), más la tenacidad de rotura multiplicada por la sección rota y otros términos energéticos en los que principalmente figura la energía con que los trozos de la probeta salen despedidos en una rotura. Para la serie de roturas designadas de M-1 a M-18, cuya resiliencia media fue de $3,8 \text{ kgm/cm}^2$, se estima según las expresiones deducidas que la energía absorbida se repartía aproximadamente en un 12% para alcanzar la grieta crítica, un 30% de energía cinética de los trozos y otras pérdidas y un 58% que corresponde a la tenacidad de rotura.

Finalmente aunque las ecuaciones 106 dan para G'_c valores concordantes con los valores de las columnas G_c (2), calculados según la citada expresión de Bueckner, conviene tener en cuenta que dichas expresiones requieren procedimientos de contraste más directos, es decir, estimando G'_c a partir de datos con roturas de probetas de un espesor de unos 25 a 30 mm, ya que es bien conocido que el valor de G_c , en condiciones de deformación plana, sólo es independiente del tamaño de la probeta para dimensiones como las que se acaban de mencionar o superiores a ellas, circunstancia que no nos ha permitido llevar más adelante nuestras comprobaciones, dado que la capacidad de nuestro equipo está limitada a 30 kgm.

CONCLUSIONES

- 1º.- Se ha conseguido una instrumentación simplificada de una máquina de choque convencional, que conserva toda su versatilidad en la obtención de registros oscilográficos fuerza-tiempo, correspondientes a roturas con probetas Mesnager.
- 2º.- Se ha sustituido la amplificación intermedia de la señal por una regulación con la tensión de alimentación al puente de Wheastone. Las variaciones de la constante de calibrado que introduce dicha regulación se han resuelto encontrando una relación lineal entre ambas variables, de tal manera que basta un calibrado previo a dos tensiones extremas, para conocer el valor de dicha constante a cualquier voltaje de trabajo, según el tamaño de pulso deseado.
- 3º.- Un circuito de señalización muy sencillo permite identificar las particularidades de los pulsos fuerza-flecha, con buen carácter cualitativo.
- 4º.- Se encuentra un procedimiento de calibrado que, mediante un tratamiento estadístico de datos de los pulsos oscilográficos, puede servir de control en series de roturas, pero la índole de los datos que se han de reunir no permiten que se pueda prescindir de un calibrado cuasiestático previo del equipo.
- 5º.- Se ha efectuado un examen de los movimientos que efectúa una probeta durante el corte tiempo que dura su rotura y

por consideraciones geométricas se han deducido expresiones para su giro y deslizamiento sobre los apoyos. La estimación de pérdidas energéticas, basada en tales expresiones, no ha conducido a resultados satisfactorios, dada la complejidad de los estados de tensión.

- 6º.- Se encuentra que la cifra de resiliencia varía con la carga aplicada cuando ésta se aproxima a la que absorbe la probeta y se estima que la energía absorbida es independiente de la carga aplicada cuando se aplica ésta en un exceso de 6 kgm. sobre la primera.
- 7º.- Se concluye que el área bajo los pulsos registrados oscilográficamente, pulsos fuerza-tiempo, disminuye a medida que aumenta la energía aplicada y que también es necesario aplicar un exceso de carga para que el área sea independiente de dicha carga.
- 8º.- La disminución del área bajo los pulsos citados se debe a la disminución del tiempo de rotura a medida que aumenta la carga aplicada.
- 9º.- La fuerza máxima y la del límite general de los pulsos disminuyen cuando la energía aplicada es muy próxima a la absorbida por una probeta, pero este efecto sobre el área del pulso, es de menor cuantía que el que produce, la disminución de la carga aplicada.

102.- Se deduce una expresión para el cálculo de las energías absorbidas por las probetas en función de las energías aplicadas y del área bajo los pulsos, y se propone dicha expresión en sustitución de las dos expresiones que conjuntamente se presentan para este fin en la bibliografía. La expresión que se propone para la estimación de pérdidas energéticas no detectables por los extensímetros eléctricos, no se ha podido contrastar con resultados experimentales.

112.- Las expresiones deducidas para el cálculo de la tenacidad de rotura a partir de la información que proporcionan los pulsos oscilográficos, fuerza-tiempo, de roturas con probetas Mesnager, suministran un criterio eficaz basado en una propiedad característica de cada estado metalúrgico que permite estimar las cualidades de rotura de un material, en contraste con la resiliencia. Se concluye respecto al grado de bondad de tales expresiones, que están en buen acuerdo con los valores obtenidos de expresiones reputadas como razonablemente buenas y se sugiere que dada la responsabilidad que supone el empleo de estas cifras como datos de diseño en los casos que se ha de prevenir la rotura, que tales expresiones deben someterse a un contraste más directo en roturas de probetas con grietas previas generadas, en las que la aplicación de dichas expresiones debe teóricamente conducir a una mejor concordancia.

*Vincent
Carlo*

APENDICE

ACEROS SELECCIONADOS Y TRATAMIENTOS TERMICOS.

Se ensayaron seis aceros en nueve series de roturas. En cada serie, las probetas tenían el mismo tratamiento térmico con objeto de obtener valores de resiliencia aproximadamente iguales, para lo cual tanto los tratamientos como las condiciones de ensayo se han controlado con toda meticulosidad. Las dispersiones observadas en las cifras de resiliencia se atribuyen principalmente a heterogeneidades propias de los materiales, a pesar de que procedían de una misma colada.

En primer lugar todos los aceros fueron sometidos a un tratamiento de normalizado, conservando el tamaño de grano del material técnico de origen.

Las nueve series ensayadas se efectuaron con los siguientes aceros :

SERIE 1.

Acero F-144

Austenizado a 875°C. y templado en aceite.

Se trata de un acero mangano-silicioso para muelles, de la siguiente composición nominal:

% C	Mn	Si
0,55	0,85	1,75

SERIE 2.

Acero F-144

Austenizado a 875°C., templado en aceite y revenido a 420°C, una hora.

En este estado se viene utilizando para trabajos de corte y choque en frío.

SERIE 3.

Acero F-127

Austenizado a 830°C., templado en aceite y revenido a 460 °C., una hora.

Acero tenaz, para piezas de responsabilidad y resistente a la fluencia, de composición nominal:

% C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
0,30	0,55	0,22	0,65	2,50	0,40

SERIE 4.

Acero F-127

Igual tratamiento de temple que el anterior y revenido a 580 °C., una hora.

SERIE 5.

Acero F-123

Austenizado a 830°C., templado en aceite y revenido a 550 °C., una hora.

Acero tenaz para piezas de gran resistencia , de composición nominal:

% C	Mn	Si	Cr	Ni
0,30	0,55	0,22	0,65	3,0

SERIE 6.

Acero F-123

Igual tratamiento de temple que el anterior y revenido a 620°C., una hora.

SERIE 7.

Acero F-112

Austenizado a 875°C., templado en aceite y revenido a 525°C., una hora.

Acero suave al carbono, para piezas de resistencia media y buena tenacidad, de composición nominal:

% C	Mn	Si
0,25	0,55	0,22

SERIE 8.

Acero F-152

Austenizado a 875°C., y enfriado en el horno.

Acero al níquel para cementación. Piezas poco cargadas. Composición nominal:

% C	Mn	Si	Ni
0,12	0,45	0,22	5,0

SERIE 9.

Acero F-152

Igual tratamiento de temple ^uque el anterior y revenido a 650°C., una hora.

RESULTADOS EXPERIMENTALES .

A continuación se incluyen los valores experimentales medidos directamente en los oscilogramas correspondientes a roturas con el péndulo Charpy instrumentado, así como los valores obtenidos de las dos integraciones gráficas sucesivas y otros valores calculados, todos los cuales corresponden a la SERIE 3 de roturas, del acero F-127.

Se dispone de otros ocho conjuntos de tablas y datos como los que a continuación se incluyen , los que no se presentan por razones obvias de brevedad.

Desig.	E _g Kgm	E _a Kgm	ρ Kgm/cm ²	E _a media	ρ media	h _e mm	h _{max} mm	t _t ms	h _e media	h _{max} media	t _t media
E-1	6,55	5,00	6,25	5,32	6,68	74	91	3,0	70	88	3,2
E-2	6,55	5,60	7,00			70	89	3,4			
E-3	6,55	5,35	6,68			65	85	3,3			
E-4	8,10	5,50	6,88	5,25	6,58	--	--	--	74	91	3,1
E-5	8,10	5,10	6,38			--	--	--			
E-6	8,10	5,15	6,42			74	91	1			
E-7	8,40	5,65	7,08			68	84	3,2			
E-8	8,40	5,40	6,75	5,43	6,67	70	87	3,0	70	86	3,0
E-9	8,40	5,25	6,28			71	86	2,7			
E-10	8,70	5,50	6,88			71	88	3,0	70	86	3,0
E-11	8,70	5,30	6,62	5,47	6,84	69	85	2,8			
E-12	8,70	5,60	7,00			70	85	3,1			
E-13	11,8	5,65	7,08			75	99	2,6			
E-14	11,8	5,45	6,80	5,60	7,00	70	99	2,4	72	99	2,6
E-15	11,8	5,75	7,18			71	99	2,8			
E-16	17,8	5,65	7,08			79	90	2,0	76	90	1,9
E-17	17,8	5,20	6,50	5,48	6,86	72	87	1,8			
E-18	17,8	5,60	7,00			76	91	1,9			
E-19	29,6	6,20	7,75			72	87	1,7			
E-20	29,6	6,50	8,12			72	88	1,8			
E-21	29,6	5,95	7,42	6,20	7,80	72	91	1,6	72	89	1,7

Desig.	E g Kgm	Ae cm ²	A _p cm ²	A _r cm ²	A _t cm ²	A _e Valores medios	A _p Valores medios	A _r Valores medios	A _t	t _e ms	t _{ep} ms	t _t ms	t _e Valores medios	t _{ep} Valores medios	t _t
E-1	6,55	1,70	6,75	11,7	20,1	1,73	7,40	11,5	20,6	0,22	0,54	3,0	0,24	0,62	3,20
E-2	"	1,85	8,20	12,1	22,1	1,5	5,30	9,20	16,0	0,26	0,68	3,4	0,22	0,48	3,10
E-3	8,10	1,65	7,35	10,7	19,7	1,23	5,38	9,52	16,1	0,26	0,64	3,3	0,23	0,51	2,97
E-6	"	---	---	---	---	1,38	4,13	10,1	15,1	---	---	---	0,21	0,45	2,97
E-7	8,40	1,55	5,70	9,85	17,1	1,53	3,92	8,02	13,1	0,24	0,54	3,2	0,21	0,41	2,60
E-8	"	1,25	5,75	9,10	16,1	1,62	3,42	4,67	9,70	0,24	0,52	3,0	0,18	0,35	1,87
E-9	"	0,90	4,70	9,60	15,2	0,70	3,17	4,13	8,00	0,20	0,46	2,7	0,12	0,27	1,70
E-10	8,70	1,20	2,15	12,6	15,9					0,22	0,46	3,0			
E-11	"	1,50	5,10	7,90	14,5					0,22	0,44	3,1			
E-12	11,8	1,45	5,15	9,80	16,4					0,20	0,40	2,6			
E-13	"	1,70	3,65	8,45	13,8					0,22	0,40	2,4			
E-14	"	1,50	3,90	7,60	13,0					0,22	0,46	2,8			
E-15	"	1,40	4,20	8,00	13,6					0,20	0,40	2,0			
E-16	17,8	1,55	4,35	4,00	9,90					0,14	0,30	1,8			
E-17	"	1,60	2,80	5,00	9,40					0,18	0,36	1,9			
E-18	"	1,70	3,10	5,00	9,80					0,12	0,26	1,7			
E-19	29,6	0,60	3,00	4,20	7,80					0,14	0,32	1,8			
E-20	"	0,70	3,60	4,20	8,50					0,10	0,24	1,6			
E-21	"	0,70	2,90	4,00	7,60										

Desig.	ΔV m/s	ΔV_e m/s	ΔV_p m/s	ΔV_r m/s	ΔV ΔV_e ΔV_p ΔV_r Valores medios
E-1	1,30	0,100	0,433	0,767	
E-2	1,58	0,125	0,590	0,865	1,45 0,117 0,53 0,80
E-3	1,46	0,126	0,570	0,764	
E-6	1,13	0,108	0,362	0,660	1,13 0,108 0,36 0,66
E-7	1,24	0,110	0,421	0,708	
E-8	1,17	0,092	0,438	0,640	1,18 0,098 0,42 0,69
E-9	1,12	0,094	0,400	0,720	
E-10	1,16	0,115	0,345	0,700	
E-11	1,11	0,106	0,340	0,664	1,15 0,109 0,34 0,70
E-12	1,19	0,106	0,344	0,740	
E-13	0,95	0,092	0,338	0,520	
E-14	0,91	0,095	0,335	0,480	0,94 0,100 0,32 0,52
E-15	0,97	0,110	0,300	0,560	
E-16	0,74	0,110	0,310	0,320	
E-17	0,67	0,075	0,223	0,372	0,71 0,087 0,28 0,35
E-18	0,73	0,075	0,293	0,362	
E-19	0,66	0,057	0,230	0,373	
E-20	0,63	0,054	0,268	0,308	0,62 0,057 0,26 0,31
E-21	0,58	0,061	0,280	0,240	

Desig.	V _o m/s	V _f m/s	V _e m/s	V _{ep} m/s	V _f Valores medios	V _e Valores medios	V _{ep} Valores medios	t _p ms	t _r ms	t _p Valores medios	t _r Valores medios	t _t
E-1	2,56	1,26	2,46	2,03	1,11	2,44	1,91	0,32	2,46	0,37	2,61	3,2
E-2	2,56	0,98	2,44	1,85	1,72	2,74	2,38	0,42	2,72	0,26	2,62	3,1
E-3	2,56	1,10	2,43	1,86	1,72	2,74	2,38	0,38	2,66	0,28	2,46	3,0
E-6	2,85	1,72	2,79	2,37	1,72	2,80	2,41	0,26	2,66	0,28	2,46	3,0
E-7	2,90	1,66	2,81	2,50	1,72	2,80	2,41	0,30	2,48	0,28	2,46	3,0
E-8	2,90	1,73	2,81	2,50	1,72	2,80	2,41	0,28	2,24	0,24	2,51	3,0
E-9	2,90	1,78	2,84	2,49	1,80	2,84	2,50	0,26	2,54	0,24	2,51	3,0
E-10	2,95	1,79	2,84	2,50	1,80	2,84	2,50	0,24	2,34	0,24	2,51	3,0
E-11	2,95	1,84	2,84	2,50	1,80	2,84	2,50	0,24	2,66	0,24	2,51	3,0
E-12	2,95	1,76	2,84	2,50	1,80	2,84	2,50	0,24	2,20	0,21	2,19	2,6
E-13	3,43	2,48	3,34	3,00	2,49	3,33	3,00	0,20	2,00	0,21	2,19	2,6
E-14	3,43	2,52	3,34	3,00	2,49	3,33	3,00	0,20	2,36	0,21	2,19	2,6
E-15	3,43	2,46	3,32	3,02	2,49	3,33	3,00	0,22	1,60	0,18	1,55	1,9
E-16	4,22	3,48	4,11	3,80	3,51	4,13	3,86	0,20	1,50	0,18	1,55	1,9
E-17	4,22	3,55	4,15	3,92	3,51	4,13	3,86	0,16	1,54	0,18	1,55	1,9
E-18	4,22	3,49	4,15	3,85	3,51	4,13	3,86	0,18	1,44	0,18	1,44	1,7
E-19	4,44	4,78	5,38	5,15	4,82	5,38	5,12	0,14	1,48	0,15	1,44	1,7
E-20	5,44	4,81	5,39	5,12	4,82	5,38	5,12	0,18	1,36	0,15	1,44	1,7
E-21	5,44	4,86	5,38	5,10	4,82	5,38	5,12	0,14	1,36	0,15	1,44	1,7

Desig.	v_o^2 (m/s) ²	v_f^2 (m/s) ²	Ea Calc. Kgm	Ea Exp. Kgm	Ea Calc. Val. medios	Ea Exp. medios	v_e^2 (m/s) ²	Ee Kgm	Ee medios	v_{ep}^2 (m/s) ²	E _p Kgm	E _p medios	E _r Kgm	E _r med.	E _{ep} Kgm
E-1	6,55	1,59	4,97	5,00	5,30	5,32	6,05	0,502	0,58	4,11	1,94	2,31	2,52	2,41	4,97
E-2	6,55	0,93	5,59	5,60	5,30	5,32	5,93	0,620	0,58	3,40	2,53	2,31	2,44	2,41	5,59
E-3	6,55	1,21	5,34	5,35	5,16	5,25	5,93	0,629	0,60	3,48	2,45	1,85	2,27	2,70	5,34
E-6	8,12	2,96	5,16	5,15	5,16	5,25	7,52	0,601	0,60	5,66	1,85	2,02	2,70	2,70	5,16
E-7	8,41	2,76	5,65	5,65	5,43	5,43	7,78	0,626	0,57	5,61	2,18	2,02	2,85	2,85	5,65
E-8	8,41	2,99	5,41	5,40	5,43	5,43	7,89	0,525	0,57	5,62	2,27	2,02	2,62	2,62	5,42
E-9	8,41	3,17	5,24	5,25	5,43	5,43	7,87	0,536	0,57	6,25	1,62	2,02	3,08	2,85	5,24
E-10	8,70	3,20	5,50	5,50	5,47	5,47	8,04	0,661	0,63	6,20	1,84	1,82	3,00	3,02	5,50
E-11	8,70	3,39	5,31	5,30	5,47	5,47	8,09	0,615	0,63	6,29	1,80	1,82	3,90	3,02	5,31
E-12	8,70	3,10	5,60	5,60	5,47	5,47	8,09	0,615	0,63	6,25	1,84	1,82	3,15	3,02	5,31
E-13	11,8	6,15	5,62	5,65	5,58	5,60	11,1	0,623	0,67	9,00	2,14	2,06	3,85	2,86	5,62
E-14	11,8	6,35	5,42	5,45	5,58	5,60	11,1	0,643	0,67	9,00	2,12	2,06	3,65	2,86	5,42
E-15	11,8	6,05	5,71	5,75	5,58	5,60	11,0	0,743	0,67	9,12	1,90	2,06	3,07	2,86	5,71
E-16	17,8	12,1	5,69	5,65	5,54	5,48	16,9	0,916	0,72	14,4	2,45	2,20	3,33	2,59	5,70
E-17	17,8	12,6	5,20	5,20	5,54	5,48	17,2	0,627	0,72	15,4	1,80	2,20	2,78	2,59	5,21
E-18	17,8	12,2	5,72	5,60	5,54	5,48	17,2	0,627	0,72	14,8	2,34	2,20	2,66	2,59	5,72
E-19	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
E-20	29,6	23,1	6,46	6,50	6,20	6,20	29,0	0,590	0,62	26,2	2,80	2,87	3,07	2,88	6,46
E-21	29,6	23,6	5,98	5,95	6,20	6,20	28,9	0,656	0,62	26,0	2,93	2,87	2,39	2,98	5,98

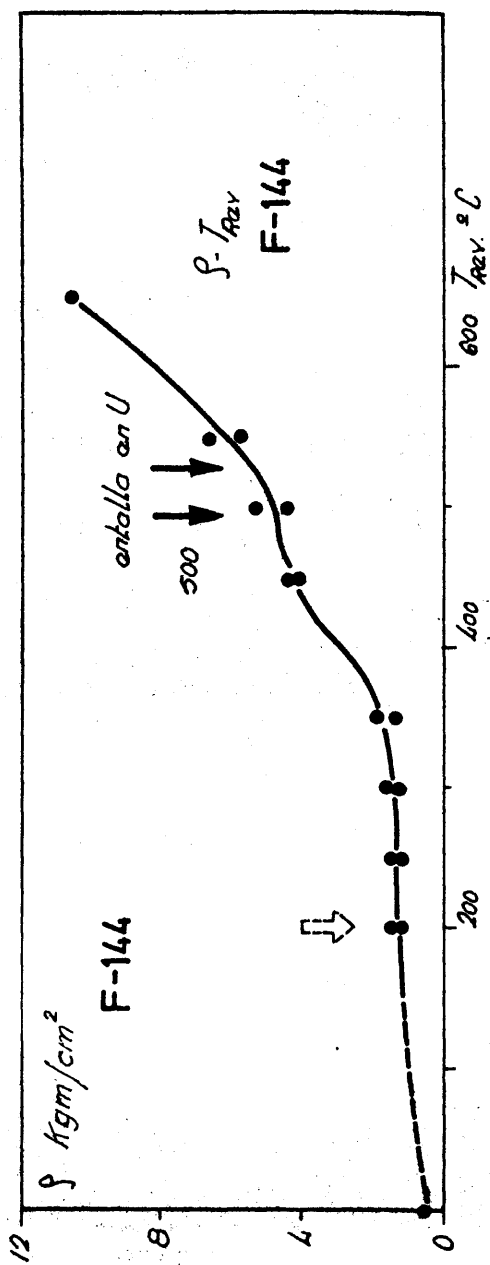


Fig.A Curva resiliencia-temperatura de revenido. La flecha de trazos indica el mínimo valor medido. Las flechas llenas indican la disminución del ritmo de crecimiento de la resiliencia a la temperatura de 500°C..

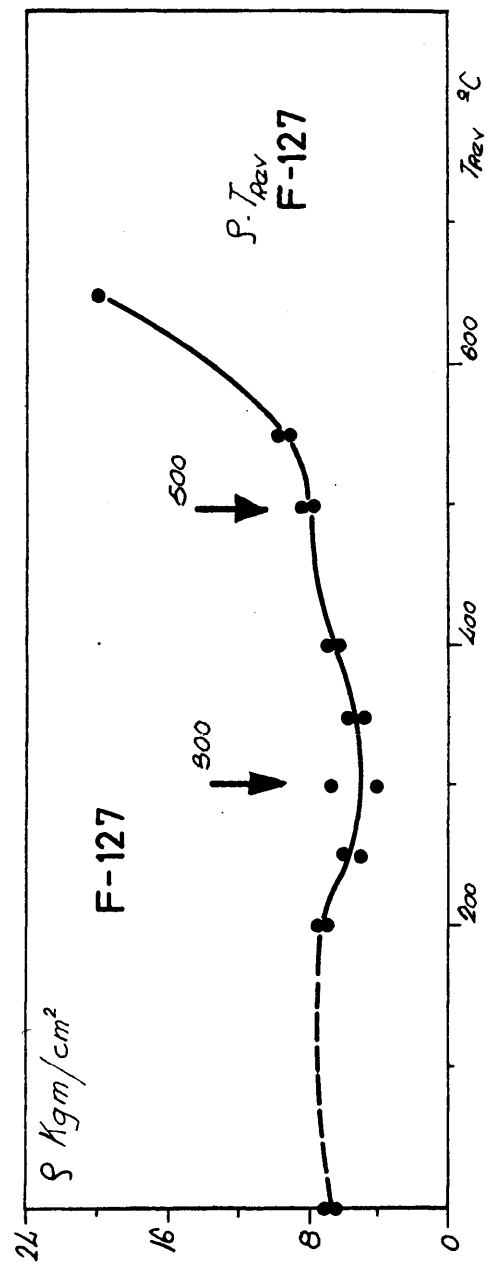


Fig. B Curva resiliencia-temperatura de revenido para el acero F-127. Las flechas indican dos mínimos de resiliencia a temperaturas de 300 y 500°C..

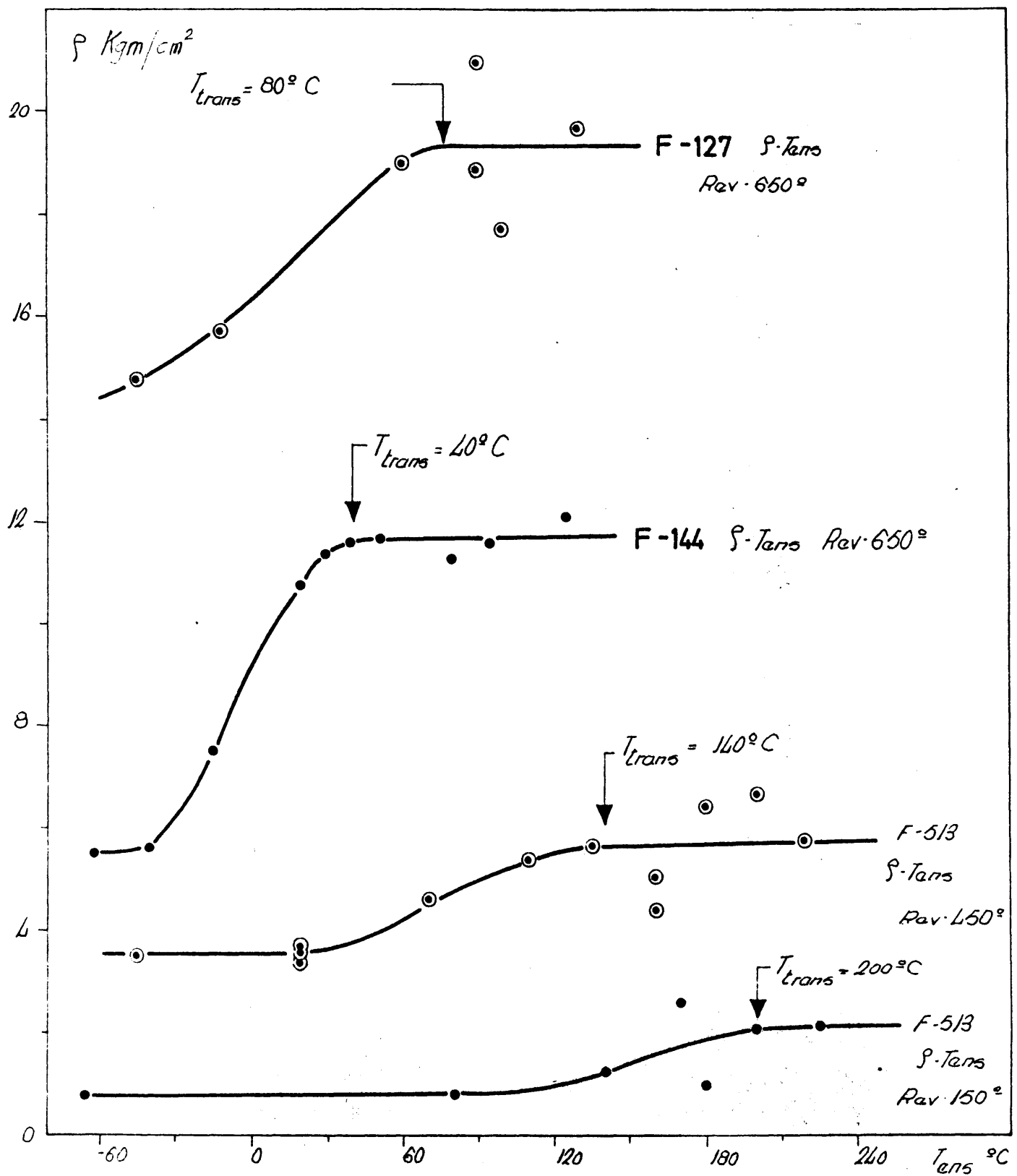


Fig. C Curvas de temperatura de transición. El acero F-127 presenta una fragilización de unos 160°C ., y el F-144 de 100°C ., con caídas de 5 y 8 Kgm., respectivamente, en estos intervalos de temperatura.

COMPARACION DE AREAS PARCIALES Y TOTALES CORRESPONDIENTES
A PULSOS DE PROBETAS ENTALLADAS EN "U" Y EN "V".

La Fig. D, representa el área total bajo los pulsos en función de la temperatura de revenido, para el acero F-112. Las curvas continuas y de trazos corresponden a probetas entalladas en "U" y en "V", respectivamente.

La Fig. E presenta las áreas correspondientes a la etapa plástica y de rotura (líneas continuas y de trazos análogamente) separadas del área total del pulso como áreas parciales .

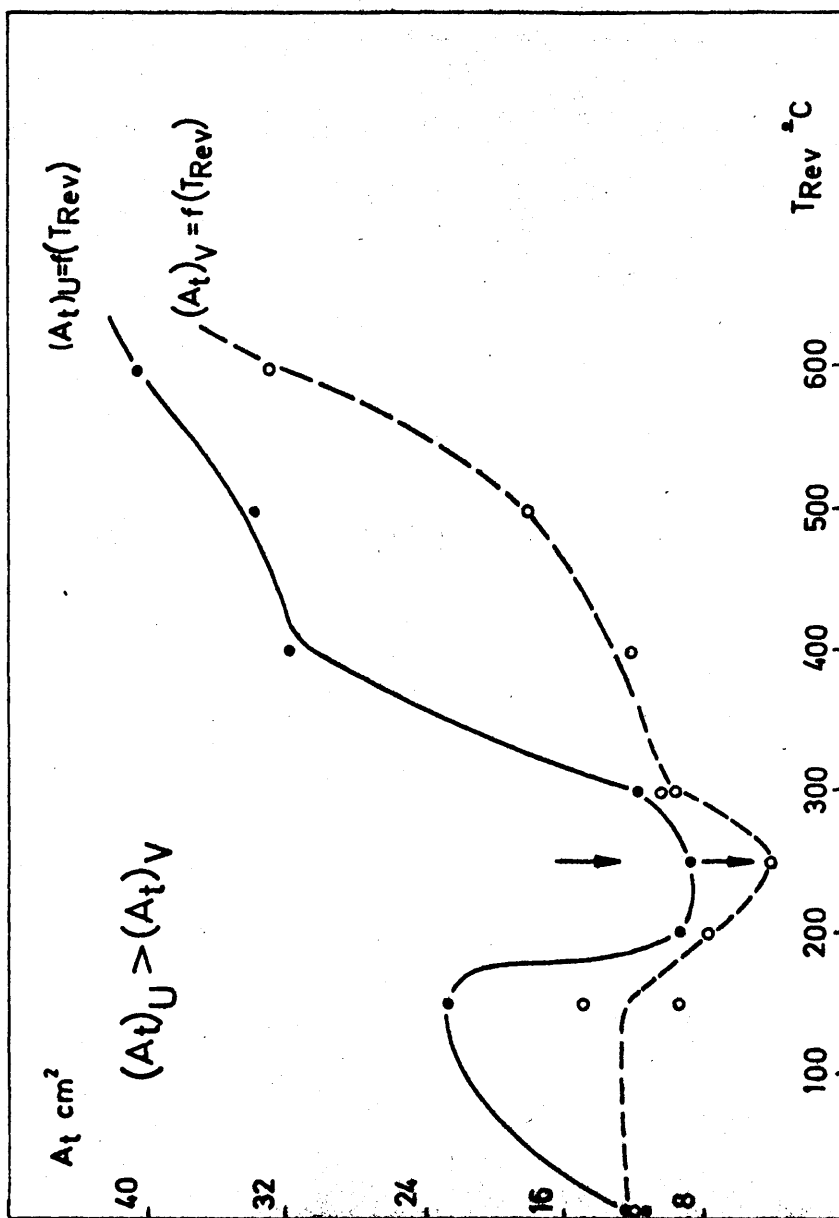


Fig.D Representación de las áreas correspondientes a pulsos del acero F-112, frente a la temperatura de revenido. Los sub-índices "U" y "V" indican que las áreas corresponden a probetas con ambos tipos de entallas. Ambas áreas señalan un mínimo a 250°C siendo menores las áreas correspondientes a probetas entalladas en "V".

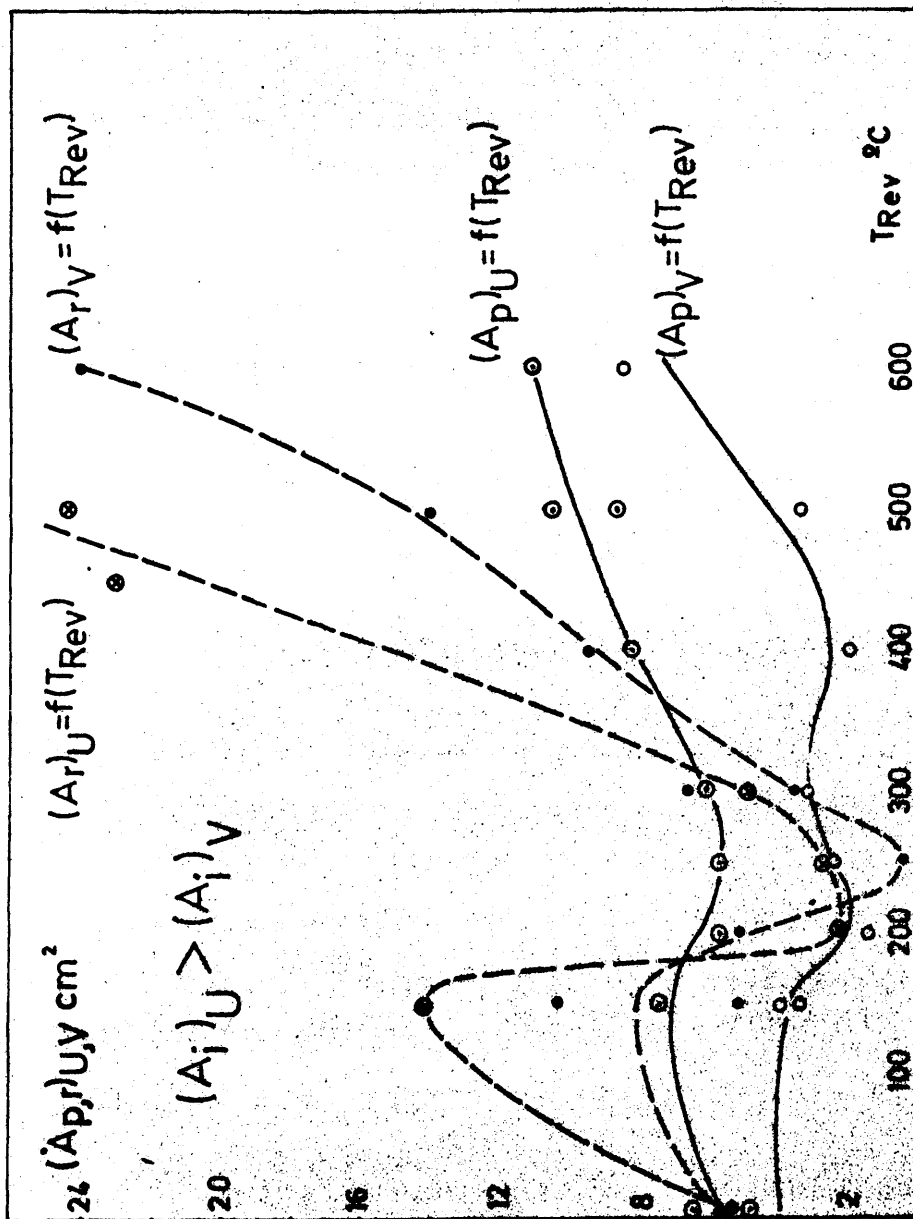


Fig. E Las áreas plásticas correspondientes a probetas entalladas en "V", parecen reflejar bien la fragilidad de 425°C. (línea continua). Las líneas de trazos en "U" y en "V" presentan grandes variaciones y son las principales responsables del aspecto de la curva área total- temp. de revenido.

ESTIMACION DEL FACTOR DE CONCENTRACION DE TENSION DE UNA PROBETA MESNAGER.

Para el calculo del factor de concentraci3n de tensi3n, se parte de las expresiones publicadas por Neuber (Ref.28).

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} ; \quad \alpha'_k = 1 + \frac{(\alpha_{fk} - 1)(\alpha_{tk} - 1)}{\sqrt{(\alpha_{fk} - 1)^2 + (\alpha_{tk} - 1)^2}}$$

$$\alpha_k = 1 + \frac{\alpha'_k - 1}{1 + \frac{\pi}{\pi - w} \sqrt{\rho'/\rho}} ; \quad \alpha_{fk} = 1 + 2\sqrt{\frac{t}{\rho}}$$

$$\alpha_1 = \frac{2\left(\frac{a}{\rho} + 1\right)\sqrt{\frac{a}{\rho}}}{\left(\frac{a}{\rho} + 1\right)\text{arctg}\sqrt{\frac{a}{\rho}} + \sqrt{\frac{a}{\rho}}}$$

$$\alpha_2 = \frac{4 \frac{a}{\rho} \sqrt{\frac{a}{\rho}}}{3 \left[\left(\frac{a}{\rho} - 1 \right) \text{arctg} \sqrt{\frac{a}{\rho}} + \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right]}$$

$$\alpha_{tk} = \frac{2\left(\frac{a}{\rho} + 1\right) - \alpha_1 \sqrt{\frac{a}{\rho} + 1}}{\frac{4}{\alpha_2} \left(\frac{a}{\rho} + 1 \right) - 3\alpha_1}$$

que aplicadas a la geometría de la entalla Mesnager conducen a las tablas de valores siguientes :

PROFUNDIDAD DE ENTALLA VARIABLE. RADIO DE CURVATURA CONSTANTE.

s	t	a	t/p	a/p	α_{fk}	$\sqrt{a/p}$	$\arctg \sqrt{a/p}$	α_1	α_2	α_{tk}	α'_k	α_k
1	0	10	0	10	1,00	3,16	1,265	4,08	2,89	2,92	1,00	1,00
1	2	8	2	8	3,83	2,83	1,231	3,65	2,62	2,86	3,30	2,36
1	5	5	5	5	5,47	2,24	1,151	2,94	2,18	2,27	2,10	1,65
1	10	0	10	0	7,35	0,00	0,000	--	--	--	--	--

RADIO DE CURVATURA VARIABLE. PROFUNDIDAD DE ENTALLA CONSTANTE.

t	s	a	t/p	a/p	α_{fk}	$\sqrt{a/p}$	$\arctg \sqrt{a/p}$	α_1	α_2	α_{tk}	α'_k	α_k
2	0,0	8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2	0,8	8	2,5	40	4,16	3,16	1,265	4,08	2,89	2,92	3,39	2,41
2	1,0	8	2,0	8	3,83	2,83	1,231	3,65	2,62	2,86	3,30	2,36
2	1,6	8	1,25	5	3,24	2,24	1,151	2,94	2,18	2,27	2,86	2,10
2	2,0	8	0,00	0	1,00	0,00	0,000	0,00	--	--	1,00	1,00

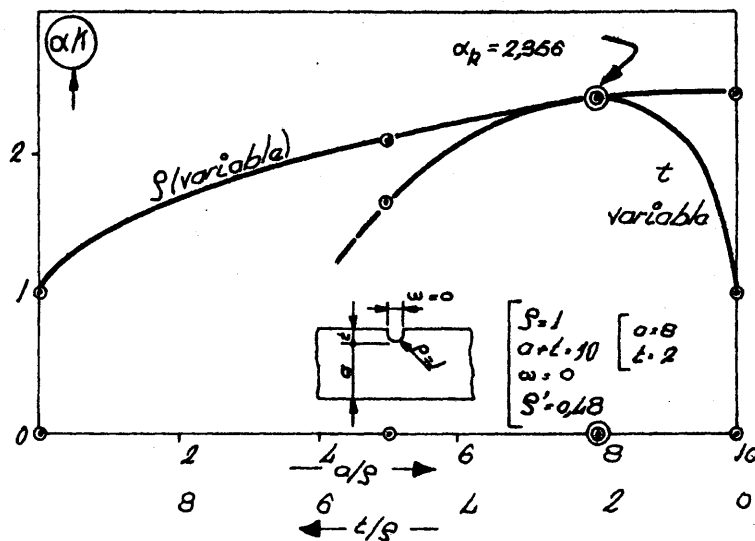


Fig. F Curvas de variación del factor de concentración de tensión, para radio de curvatura y profundidad de entalla variables en una probeta de tipo Mesnager

TABLA I

SERIE y Acero	E _g Kgm	ρ Kgm/cm ²	f _m Kg	f _e Kg	f _{max} Kg
1 SERIE F-144	2,10	0,42	914	1870	1980
	3,40	0,20	610		1535
	5,25	0,33	736		1870
	5,50	0,31	685		1700
	5,75	0,37	540		1830
	17,8	0,46	-		-
	29,6	0,73	872		2160
2 SERIE F-144	3,4	2,82	2306	3280	3900
	6,5	3,94	2282	3320	4070
	6,9	3,50	2135	3320	4030
	7,1	4,04	2260	3610	4440
	13,6	3,80	2450	3740	4480
	23,25	4,00	2320	3775	4525
	29,6	3,87	2145	3940	4240
3 SERIE F-127	6,55	6,68	960	2900	3650
	8,10	6,58	855	3280	4525
	8,40	6,67	892	2900	3570
	8,70	6,84	864	2900	3570
	11,8	7,02	864	2900	4110
	17,8	6,86	847	3160	3740
	29,6	7,80	782	2990	3690
4 SERIE F-127	10,1	11,7	1110	2620	3320
	10,8	12,5	900	2450	3190
	11,4	13,0	810	2530	3240
	11,8	12,5	776	2360	3320
	13,6	12,9	905	-----	3160
	17,8	13,4	-	2160	-----
	29,6	13,0	-	-----	2860
5 SERIE F-123	10,8	12,8	658	2360	3080
	11,3	13,1	748	2450	3080
	11,8	13,1	806	2360	3030
	13,6	13,9	602	2490	3120
	17,8	13,7	736	2530	3160
	23,25	13,8	826	2410	3080
	29,6	13,8	830	2360	3120

SERIE y Acero	E _g Kgm	ρ Kgm/cm ²	f _m Kg	f _e Kg	f _{max} Kg
6 SERIE F-123	15,0	18,2	826	2075	2860
	15,4	16,8	718	2075	2740
	15,4	16,9	706	2075	2780
	15,6	18,2	802	2075	2780
	17,8	17,5	806	2035	2825
	23,25 29,6	17,3 --	952 -	2240 ----	2780 ----
7 SERIE F-112	21,35	26,4	947	1742	2410
	21,90	25,8	860	1742	2410
	23,25	26,8	739	1742	2360
	24,80	27,2	830	1870	2450
	25,80	20,7	830	1742	2325
	26,60	26,6	-	1910	2620
	28,10	21,9	888	1980	2620
	28,80 29,60	26,0 28,0	764 830	1700 1870	2285 2490
8 SERIE F-152	17,5	20,8	677	1330	1980
	17,8	21,6	723	1330	2035
	23,25	21,4	718	1330	1980
	29,60	22,6	802	1410	2035
9 SERIE F-152	12,3	13,3	747	1452	2570
	13,5	14,5	698	1493	2570
	17,8	15,6	855	1700	2700
	23,25	14,5	736	1535	2620
	29,6	16,3	914	1870	2660

DEDUCCION COMUNICADA POR B.AUGLAND PARA EL CALCULO DE LA ENERGIA ABSORBIDA EN LA ROTURA DE UNA PROBETA.

Conservando su simbolismo:

V_0 = velocidad inicial del martillo

$W_0 = \frac{1}{2} m \cdot V_0^2$: Energia inicial del martillo

$P(t)$ = Función fuerza-tiempo

La energia de choque deducida de la curva carga-tiempo , entre ($t=0$ y $t=t_1$), es

$$W_t = V_0 \int_0^{t_1} P(t) dt \quad (1)$$

La energia real de choque será

$$W = \int_0^{t_1} P(t) \cdot V(t) dt \quad (2)$$

La velocidad del martillo en el instante (t) será

$$V(t) = V_0 - \frac{1}{m} \int_0^t P(t) dt \quad (3)$$

sustituyendo (3) en (2), resulta

$$W = V_0 \int_0^{t_1} P(t) dt - \frac{1}{m} \int_0^{t_1} \left[P(t) \int_0^t P(t) dt \right] dt \quad (4)$$

$$W = V_0 \int_0^{t_1} P(t) dt - \frac{1}{2m} \left[\int_0^{t_1} P(t) dt \right]^2 \quad (5)$$

ya que el segundo miembro de la ec.(4) es de la forma:

$$\int u.v' = u.v - \int v.u'$$

siendo

$$u = v = \left[\int P(t)dt \right]$$

Sustituyendo en la ec.(5)

$$m = \frac{2W_0}{v_0^2}$$

y de la ecuación (1) , resulta:

$$W = W_t - \frac{W_t^2}{4W_0}$$

CALCULO DE LA ENERGIA REAL .DEDUCCION DE M.GRUMBA y OTROS,(20).

Empleando su nomenclatura,

Los subíndices (o) y (f) se refieren al instante inicial y final del choque, respectivamente.

t = tiempo.

Y = aceleración en el instante (t).

v = Velocidad en el instante (t).

E_c= energía real corregida.

E_a= Energía calculada de los pulsos suponiendo que, durante el choque, el martillo se mueve a velocidad constante v_o.

E_o=energía inicial del martillo.

m =masa del martillo.

Por definición

$$E_o = - \int_{t_o}^{t_f} m.Y.v.dt = - \frac{1}{2}m(v_f^2 - v_o^2)$$

$$E_a = - \int_{t_0}^{t_f} m \cdot \gamma \cdot v_0 \cdot dt = - m v_0 (v_f - v_0)$$

$$E_0 = \frac{1}{2} m v_0^2$$

$$E_c = - \int_{t_0}^{t_f} m \cdot \gamma \cdot (v - v_0) dt - \int_{t_0}^{t_f} m \cdot \gamma \cdot v_0 \cdot dt$$

$$E_c = - \int_{t_0}^{t_f} m \cdot \gamma \cdot (v - v_0) dt - E_a$$

Entonces,

$$4E_0(E_c - E_a) = - 2m^2 v_0^2 \int_{t_0}^{t_f} (v - v_0) \cdot \gamma \cdot dt$$

$$4E_0(E_c - E_a) = - 2m^2 v_0^2 \int_{v_0}^{v_f} (v - v_0) \cdot d(v - v_0)$$

$$4E_0(E_c - E_a) = - m^2 v_0^2 (v_f - v_0)^2$$

$$4E_0(E_c - E_a) = - E_a^2$$

$$E_c = E_a - \frac{E_a^2}{4E_0}$$

BIBLIOGRAFIA

- (1).- The Brittle Fracture Story
C.P. Tipper
J.Baker, Ed. Cambridge. London 1962.
- (2).- The Brittle Fracture of Steel
W.D. Biggs
Mc Donald y Evans Ltd. London 1960.
- (3).-The Brittleness of Steel
M. Szczepanski
J.Wiley. New York 1963.
- (4).- Encyclopedia of Physics
S.Flüge. Elasticity and Plasticity VI(1958)551.
- (5).- The Fracture of Metals
M.Gensamer, E.Saibel, J.T.Ransom y R.E.Lowrie
Report to the Bureau of Ships U.S.Navy 1947.
- (6).- The Propagation of Fractures in Mild-Steel Plates
G.M.Boyd
Engineering, Jan.16(1953)65-9 y 100-3.
- (7).- A Continuum Mechanics View of Crack Propagation
G.R. Irwin y A.A. Wells
Metallurgical Reviews, 10, Nº38(1965)223.
- (8).- Fracture Strengths Relative to Onset and Arrest of
Crack Propagation
G.R. Irwin, J.A. Kies y H.L. Smith
ASTM., V.58, (1958)640.
- (9).- Application of The Griffith-Irwin Theory of Crack
Propagation to the Bursting Behavior of Disks, in-
cluding Analytical and Experimental Studies
D.H. Winne y B.M. Wundt
Trans. of the ASME. Nov.(1958)1643.
- (10).-Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength
Metallic Materials
W.F.Brown y J.E. Srawley
ASTM Technical Publication, Nº 410, Dec.(1967).
- (11).-Fracture Toughness Testing and Its Applications
NASA y ASTM . Technical Publication. Nº 381, Jun.(1964)

- (12).-Sheet Fracture Toughness Evaluated by Charpy Impact
and Slow Bend
G.M. Orner y C.E. Hartbower
Weld. Research Suppl. Sept.(1961)405-s
- (13).-Impact Testing with an Instrumented Machine
H.P.Tardif y H. Marquis
Metal Progress, V.85,Nº2(1964)79.
- (14).-Instrumented Impact Testing of Low-Carbon Steels
E.A.Almond y J.D. Embury
Metal Science J., V.2,Sept.(1968)194
- (15).-Caracterización de la Fragilidad de Revenido median-
te el Ensayo de Resiliencia
J.Terraza y C.Núñez
Rev. de Metalurgia (CENIM),V.2,Nº2(1966)113.
- (16).-Análisis de la Energía de Rotura en el Ensayo de
Resiliencia
J.Terraza y C.Núñez
Rev. de Metalurgia (CENIM),V.3,Nº4(1967)314.
- (17).-Factors Affecting Transition Temperature of a Mild
Steel-The Load-Time Relationship of the Notch-Bar
Impact Test
S.Sakui, T.Nakamura y M. Ohmori
Tetsu-To-Hagane Overseas,V.1,Nº1(1961)38
- (18).- B.Augland
Welding J.,V.9,Nº9(1962)434
y Progress Report , Feb. (1959) to N.T.N.F.
- (19).-Mechanics of Deformation and Fracture in the Charpy
Test as Revealed by Dinamic Recording of Impact Loads
G.D. Fearnhouhg y Hoy
JISI.,202(1964)912.
- (20).-Essais Dynamiques de Rupture Fragile avec Enre-
gistrement
M. Grumba,M.Prudhomme y G. Sanz
Révue de Metallurgie, Avril(1969)271-81.
- (21).-Critical Energy Rate Analysis of Fracture Strength
G.R. Irwin y J.A. Kies
Welding Research Suppl., April(1954)193-98-s.
- (22).-Die Kennzeichnung der Sprödbbruchnigung eines Stahles
durch Auswertung von Kraft-Durchbiegung-Kurven aus
Kerbschlagbiegeversuchen
von Eugen Schmidtmann y Hans-Peter Mall
Archiv für das Eisenhüttenwesen,V.38,Nº7(1967)571.

- (23).-Fracture Toughness and the Charpy "V-Notch" Impact Test
B. Cotterell,
Brit. Welding J., V.9(1962)83.
- (24).-Ensayo Charpy Instrumentado y su Aplicación al Estudio de los Estados de Fragilidad del Acero
J.Terraza y C.Núñez
Rev. de Metalurgia (CENIM), V.2, N°6(1966)503
- (25).-Fracture Theory Applied to High-Strength Steels
G.R. Irwin y J.A. Kies
Metal Progress, V.78, N°2(1960)73
- (26).-Fracture Characteristics of Some High-Strength weldable Structural Steels
E.T. Wessel y L.E. Hays
Weld. Research Suppl., Nov.(1963)512-s
- (27).-Fracture
B.L. Averbach, D.K. Felbeck, G.T. Hahn y D.A. Thomas
J. Wiley. New York 1959.
- (28).-Theory of Notch Stresses
H. Neuber
J.W. Edwards Ed. Michigan 1946.